交通サービスの予約システムがもたらす社会的便益評価に関する研究

小林, 潔司

交通サービスの予約システムがもたらす社会的便益評価に関する研究

（課題番号：12650530）

平成12年度〜平成13年度
科学研究費補助金 基盤研究（C）（2）
研究成果報告書

平成14年3月

研究代表者 小 林 潔 司
（京都大学大学院工学研究科 教授）

交通サービスの予約システムがもたらす社会的便益評価に関する研究

（課題番号：12650530）

平成12年度～平成13年度
科学研究費補助金 基盤研究 (C) (2)
研究成果報告書

平成14年3月

研究代表者 小 林 潔 司
（京都大学大学院工学研究科 教授）

研究組織

研究代表者　小林　潔司（京都大学大学院工学研究科・教授）

研究分担者　松島　格也（京都大学大学院工学研究科・助手）

研究経費

平成12年度	1,500千円
平成13年度	2,100千円
合　計	3,600千円

研究発表

- 松島格也，小林潔司, タクシー・サービスのスポット市場均衡に関する研究, 土木計画学研究・論文集、No. 16, pp.591-600, 1999.
- Mehmet Ali Tuncer, Morimitsu Kurino, and Kiyoshi Kobayashi, Network evolution with cost-benefit evaluation rules, Infrastructure Planning Review, No. 16, pp.129-138, 1999.
- Myungsik Do and Kiyoshi Kobayashi，Hypothesis testing on drivers' rational expectations: An experimental approach，Journal of Civil Engineers，KSCE，Vol. 4，No. 1，pp. 1-10, 2000.
- 松島格也，小林潔司，小路剛志，不確実性下における家計のサービス予約行動，土木計画学研究・論文集，No. 16, pp. 655-666，2000.
- 小林潔司，横松宗太，不確実性下での意思決定行動モデル- 期待効用理論を越えて，国際交通安全学会誌，Vol. 26，No.1，pp.40-47，2000.
- Myungsik Do and Kiyoshi Kobayashi，Network equilibria with state-dependent congestion tolls，Journal of Civil Engineers，KSCE，Vol. 4, No. 3, pp. 119-128，2000.
- 松島格也，小林潔司，坂口潤一，混雑費用を考慮したタクシースポット市場の内生的形成，第35回都市計画学会論文集，pp. 547-552，2000.
- Kei Fukuyama, Kiyoshi Kobayashi, Kakuya Matsushima, Search, communication and co-ordination failure, Proc. of International Symposium on Entrepreneurship, Firm Growth and Regional Development in the New Economic Geography, pp.293-320, 2001.
- Myungsik Do and Kiyoshi Kobayashi, Drivers' Heterogeneous Beliefs on Traffic Conditions under Bounded Information Environment, Proc. of the 9th WCTR, on CD-ROM, 2001.
- Kakuya Matsushima, Kiyoshi Kobayashi, and Takeshi Oro, Individual reservation behavior under uncertainty, Proc. of the 9th WCTR, on CD-ROM, 2001.
- 松島格也，小林潔司，坂口潤一，タクシー・スポット市場の空間均衡と社会的便益，土木計画学研究・論文集，No. 18(4), pp. 681-690，2001.

・小林潔司・松島格也，限定合理性と交通行動モデリング：研究展望，土木学会論文集，No. 688/IV-53，pp. 5-17，2001.

目次

1　序論

比較的長いトリップ長を有する交通トリップに利用される交通機関においては，重要増加に柔軟に対応できない場合が多く，供給される座席数に制限がある場合が多い．このような交通機関としては航空機や新幹線等があげられ，また近年では長距離バスも急速に需要を伸ばしている．近年ではITS技術の発展により高速道路や駐車場などの施設を通じて自動車トリップに対しても予約制度の導入可能性が検討されている．このように予約システムはより効率的な交通状況をもたらすための需要管理システムとして注目されており，そのメカニズムの分析は非常に重要な課題であると言える．

航空機，新幹線，長距離バス等をはじめとして多くの交通機関では，供給される座席数に制約がある場合が少なくない．最近では，高度情報技術を導入した高速道路，駐車場等の交通施設利用に対しても予約制度が検討されるなど，効率的な交通需要管理のための施策として予約システムの発展が期待されている．

交通サービスに対する予約システムを考えたときに，需要側と供給側における情報の非対称性の問題が存在する．従来より情報提供がドライバーの経路選択に及ぼす影響に関する研究が蓄積されているが．そこでは交通情報の信頼性や情報提供のタイミングとドライバーの反応行動の相互関係を合理的期待均衡モデルとして定式化を行い，交通情報システムの導入がもたらす経済効果を理論的に評価している．本研究では情報提供が個人行動に及ぼす影響を分析する上で，これら一連の研究の成果を反映させて予約システムにおける情報提供の効果についても分析を行うことが可能である．

本研究では不確実な状況における個人の交通サービスの事前予約行動モデルと交通サービス供給主体の行動モデルを構築し，交通サービスにおいて予約システムの導入がもたらす社会的便益を評価する．個人が交通サービスを事前に予約するかどうかを決定する上では，予約をしなかった場合利用時点で交通機関が満席になっていて交通サービスを利用できなくなる不確実性と，利用時点まで時間が経過するうちにいま考えている交通行動よりもさらに大きな効用をもたらす別の行動計画が出現する不確実性との２つの不確実性を考慮する．この２つのリスクを組み入れた個人行動を表現する合理的期待均衡モデルを構築する．その上で合理的期待均衡モデルを内包した交通サービスの市場構造を分析し，予約システムの導入により得られる便益を検討する．

第２章，第３章においては不確実性下における交通行動を，交通情報提供に対するドライバーの反応を見ることにより検討する．以降，第２章では，不完全情報下におけるネットワーク均衡の

効率性が状況依存的な混雑料金により改善できることを示す．状況依存的混雑料金がドライバーの経路選択に先立って事前に課徴されるか，あるいは経路選択の事後において走行実績に基づいて課徴されるかによって異なった経路誘導効果を発揮する．交通情報に不完全性が存在する場合，事後変動料金によりネットワーク均衡の効率性をもっとも改善できることを示すとともに，交通情報の精度を向上させることによりドライバーの厚生状態を改善できることを示す．

第３章では，情報提供のタイミングとドライバーの異質性を考慮したモデルの定式化を行い，状況依存的な混雑料金を用いた経路誘導問題について考察する．交通情報がドライバーのpre-tripの段階で事前に通知されるか，on-tripの時点で通知されるかによって異なった経路誘導効果を発揮することを指摘する．また，社会的限界費用に応じた混雑料金を課徴することにより社会的総費用をパレート改善できることを示す．さらに，変動料金システムを導入することによりドライバーの総費用を常に減少できることを示す．

第４章では，供給制約があるようなサービスに対する家計の予約行動をモデル化する．家計は将来時点でサービスが購入できなくなる供給側のリスクと予約をキャンセルする可能性があるという需要側のリスクを同時に考慮してサービス予約の有無を決定する．本研究では供給側のリスクが内生的に決定されるような合理的期待均衡モデルを定式化する．さらに合理的期待均衡として定式化された家計の予約行動の特性について，数値計算を通じて分析する．

2　混雑料金の経路交通需要に及ぼす情報的効果に関する研究

2.1　はじめに

近年，交通情報の提供がドライバーの経路選択行動に及ぼす影響に関する研究が蓄積された．特に，on-trip 情報によるドライバーの経路誘導効果に関しては多側面からのアプローチが試みられている．ドライバーに on-trip 情報のみを提供する場合，必ずしもドライバーの社会的厚生の改善に資するとは限らない[1)]．このような視点から，文等は混雑料金を併用した on-trip 情報システムにより交通流のパレート改善を常に実現することが可能であることを示した[5)]．

本研究では，on-trip 情報システムの不完全性を克服する手段として，在宅のドライバーに事前に経路誘導情報を提供する pre-trip 情報システムに着目する．路車間情報システム等の on-trip 情報システムでは，トリップを生成した後の経路選択の段階で経路情報が提供されるため，ドライバーのトリップ生成を直接誘導できない．pre-trip 情報システムでは，ドライバーがトリップを生成する段階で道路網の情報が提供されるため，トリップ生成段階にさかのぼってドライバーの交通行動を誘導することが可能となる．

pre-trip 情報が提供された場合，ドライバーは１）トリップ生成の有無，２）出発時刻の決定という２つの意思決定問題に直面する．pre-trip 情報の効果を検討するためにはこれら２つの交通行動を同時に検討する必要があるが，本研究では静学分析の枠組みの中で，pre-trip 情報による交通需要の制御効果のみに着目することとする．多くの日常交通のように交通情報が出発時刻の決定に及ぼす影響を検討する場合には，動学的な分析枠組み[4)]が必要となろう．この意味で，本研究では pre-trip 情報のある一部の効果のみに着目していることは否めない．しかし，一部の非日常交通のように，交通情報によりその日のトリップをとりやめるか否かを判断することが問題となっている局面に関しては，静学分析によるアプローチも重要な知見を提供しうるものと考える．

本研究では on-trip 情報，pre-trip 情報の下におけるネットワーク均衡を定式化し，交通情報の提供によるドライバーの社会的厚生の改善効果について分析する．以下，**2.2 節**ではモデルの基本的な考え方を，**2.3 節**では交通情報のみを与えた場合の交通量配分モデル，**2.4 節**では交通情報と混雑料金を併用した場合の交通量配分モデルを提案する．**2.5 節**で配分結果について比較考察し，**2.6 節**で数値計算の結果を示す．

2.2 本研究の基本的考え方

2.2.1 従来の研究の概要

Walters[1]以来，混雑料金に関する研究は交通需要の抑制を通じて混雑の外部不経済を改善することを目的としてきた[8]．旅行費用の不確実性を考慮した料金の設定方法や，それが交通需要の水準に及ぼす影響についても分析されている[2][3]．最近では，混雑の外部不経済がドライバーの経路選択を歪ませる効果が認識され，混雑料金を用いた経路配分に関する研究が進展している[5][4][18]．たとえば，赤松らは確率利用者均衡モデルに基づいて混雑料金を求める方法を提案している[6]．しかし，確率的利用者均衡モデルは不確実性下の経路選択行動を明示的に考慮しておらず，情報提供の効果を経済理論と整合のとれた形で分析することは困難である．一方，混雑料金の情報的役割に関しても研究が進展してきている．Emmerink 等は種々のタイプの状況依存的な混雑料金が，経路交通需要に及ぼす影響について包括的に分析している[7]．また，文等は，固定的需要の枠組みの中ではあるが，ドライバーの危険回避選好を考慮したより一般的な分析枠組みの中で，状況依存的な混雑料金の経路誘導効果について検討している[5]．Emmerink[7]らは連続的に差別化されたドライバーにより構成される需要関数を定義し，混雑料金の提示のタイミングが経路誘導効果や消費者余剰に及ぼす影響を分析している．その際，無限に差別化された選好を持つドライバーを想定したがゆえに，ドライバーの選好の同質性や異質性が混雑料金の経路誘導効果に及ぼす影響を検討できないという限界がある．本研究では，ドライバーの効用関数を明示的に考慮したネットワーク均衡モデルを定式化し，選好の異質なドライバーの混在がネットワーク均衡や混雑料金の経路誘導効果に及ぼす影響について分析する．

2.2.2 pre-trip 情報と on-trip 情報

pre-trip 情報と on-trip 情報の本質的な差異は，それがドライバーに提供されるタイミングにある．on-trip の経路誘導情報は，すでにトリップを生成したドライバーに対してより効率的な経路選択を誘導することを目的として提供される．路車間誘導システムや路側情報板により提供される情報はこのカテゴリーに分類される．一方，pre-trip 情報は，家庭・事業所に配置された情報機器により潜在的なトリップメーカーに提供される．トリップの生成が義務づけられておらず，状況のいかんによってトリップをとりやめる意思のあるドライバーにとっては，情報提供のタイミングが重要となる．pre-trip の段階で情報が提供されれば，トリップの生成自体に直接影響を及ぼすことが可能となる．一方，トリップが義務づけられているドライバーにとっては，出発時刻の決

定問題を除けば，情報提供のタイミングはそれほど重要ではないだろう．本研究では出発時刻の選択の自由がなくドライバーはトリップを行なうか否かという選択のみが許されている場合をとりあげているため，トリップが義務づけられているドライバーにとってon-trip情報とpre-trip情報の間に本質的な差異はない．このように，トリップが義務的かそうでないかということは，交通情報の効果に本質的な違いを与えることになる．

2.3 ネットワーク均衡モデルの定式化

2.3.1 モデル化の前提条件

モデルの基本的な枠組みは参考文献[5)]と同様である．すなわち，2地点をn本の並行経路で結ぶ道路網を想定する．経路で生じる不確実性をK個の離散的な状況の生起により表現し，各状況に応じて交通費用が変化すると考える．たとえば，リンクの局所交通の変化を状況に対応させれば，走行時間関数の変化は局所交通の変化によって生じると考えることができる[5)]．交通管理者は状況$k(k=1,\cdots,K)$の生起に関して完全情報をもち生起したkをメッセージとしてドライバーに通知する．状況kの生起は外生的に与えられ状況kの生起確率をπ^kとする．トリップを生成しないドライバーの行動を表現するために，ネットワーク上に無限大の容量をもつ第0番目の仮想経路を想定する．危険中立型選好[14)]を有するQ種類のドライバーを想定し，タイプj $(j=1,\cdots,Q)$のドライバーの総数をM_j $(j=1,\cdots,Q)$で表す．危険中立型の場合，費用タームに基づいた配分原則と等価となる[5)]．タイプjのドライバーの経路iに対する間接効用関数を

$$U_i^j = Y + u^j - c_i - \tau_i \tag{2.1}$$

と表す．ここに，Yは所得，u^jはタイプjのトリップ便益（定数），c_iは経路iの一般化走行費用，τ_iは経路iの混雑料金である．c_iは次節で述べるように経路交通量X_iの関数として表され，すべてのタイプのドライバーに対して同一の値をとると考える．ドライバーの異質性をトリップ便益の差異により表現し，

$$u^1 > \cdots > u^{j-1} > u^j > \cdots > u^Q \tag{2.2}$$

を仮定する．添字jが大きくなるほど，トリップ便益が小さいドライバーであることを示している．ここで各ドライバーがトリップをとりやめた時に得られる効用水準はドライバーのタイプを問わず一定値U_0をとると考える．この時，各タイプのドライバーが少なくともトリップを行う意

思を持つためには

$$\max_i\{u^j - c_i - \tau_i\} \geq U_0 \tag{2.3}$$

が成立する必要がある．以下，表記の簡略化のために保留費用を$\bar{U}_j = u^j - U_0$と定義する．保留費用はドライバーがトリップをとりやめた場合に発生する効用損失費用を表す．保留費用はドライバーがトリップを行うために許容する費用の最大値を表し，トリップ生成に伴う費用が保留費用より小さい限りドライバーはトリップを生成する．すなわち，

$$if \quad c_i + \tau_i < \bar{U}_j \quad then \quad x_{ij} > 0. \tag{2.4}$$

が成立する．ただし，x_{ij}は経路iを選択したタイプjの交通量を表す．

2.3.2 無情報下でのネットワーク均衡

情報提供がない場合，ドライバーは状況kの生起状態を把握できない不確実な環境下で経路選択を行なう．ドライバーは状況の生起状態を区別できないため，状況全体を通じてある１つのネットワーク均衡が成立する．ここでは単一ＯＤを結ぶ並行経路で構成されるネットワークを考え，状況kが生じた場合の経路iの一般化走行費用c_i^kを経路iの交通量$X_i = \sum_j x_{ij}$の関数として

$$c_i^k(X_i) = p_i + w \cdot t_i^k(X_i) \tag{2.5}$$

と表現する[5)4)7)]．ここに，p_iは走行費用であり状況を問わず一定と仮定する．$t_i^k(X_i)$は所要時間関数，wは時間価値，走行時間関数$t_i^k(X_i)$ $(i = 1, \cdots, n; k = 1, \cdots, K)$は２階連続微分可能な１価関数であり，閉区間$[0, M]$において次の条件を満足すると仮定する．

$$\begin{aligned}
&(\text{条件}1) \quad dt_i^k(X_i)/dX_i > 0 \\
&(\text{条件}2) \quad d^2t_i^k(X_i)/dX_i^2 \geq 0 \\
&(\text{条件}3) \quad 0 \leq t_i^k(X_i) < \infty
\end{aligned} \tag{2.6}$$

なお，ドライバーのタイプが異なれば時間価値wも異なるが，議論の見通しをよくするため時間価値はタイプによらず一定であると仮定する．時間価値の異質性の問題は５．で改めて議論する．

ドライバーは，期待費用が最小となる経路を選択する．ドライバーは状況の生起について正確な情報を持たないが，経験を通じて合理的期待を形成し，各状況の生じる確率分布，及び各状況

が生じた場合に実現する経路走行費用を知っていると仮定する．経路iの期待走行費用を

$$E[c_i^k(X_i)] = \sum_{k=1}^{K} \pi^k c_i^k(X_i) \tag{2.7}$$

と表す．無情報下でのネットワーク均衡(EN)は

$$E[c_i^k(X_i)] = U_j \quad if \quad x_{ij} > 0 \tag{2.8}$$

$$E[c_i^k(X_i)] \geq U_j \quad if \quad x_{ij} = 0 \tag{2.9}$$

$$U_j = \bar{U}_j \quad if \quad x_{0j} > 0 \tag{2.10}$$

$$U_j \leq \bar{U}_j \quad if \quad x_{0j} = 0 \tag{2.11}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij} + x_{0j} = M_j, \quad x_{ij} \geq 0 \quad x_{0j} \geq 0 \tag{2.12}$$

$$(i = 1, \cdots, n; j = 1, \cdots, Q)$$

と定義できる．ここに，U_jは各タイプの均衡費用水準であり内生的に決定される．また，x_{0j}，$\bar{U}_j$はタイプjのドライバーの保留需要，保留費用を表す．式(2.8),(2.9)は１）あるタイプの利用交通量がある（$x_{ij} > 0$が成立する）限り当該経路間の期待走行費用が一致する（経路間の等期待費用原則），２）当該経路を利用するすべてのタイプのドライバーの間で当該経路の期待費用が一致する（タイプ間の等期待費用原則）が同時に成立することを要求している．したがって，結果的に$x_{ij} > 0$となるすべてのタイプ，経路の期待走行費用はある均衡費用水準U^*に一致する．式(2.10)はトリップ生成を保留するドライバーが存在する場合，各タイプの均衡費用水準は保留費用に等しくなることを表す．一方，式(2.11)は保留需要が消滅（すべてのドライバーがトリップを生成）する場合，当該タイプの均衡費用水準は保留費用より大きくならないことを表す．タイプ間の等期待費用原則により，トリップを生成しているタイプの期待費用はすべてある均衡費用水準U^*に一致する．均衡費用U^*が保留費用$\bar{U}_j$より大きくなるタイプでは，式(2.9)において任意のiに対して$E[c_i^k(X_i)] > \bar{U}_j$が成立し，すべての経路において$x_{ij} = 0$となる．すなわち，タイプ$j$のドライバーはトリップを生成しない．また，上式において各経路交通量X_i，及び保留需要x_{0j}は一意的に求まるがタイプごとの経路交通量x_{ij}は一意的に求まらない．ここで，均衡経路交通量，均衡保留需要をX_i^*, x_{0j}^*と表そう．この時，ネットワーク均衡ENにおける総費用W_{EN}は次式で与えられる．

$$W_{EN} = \sum_{i=1}^{n} X_i^* E[c_i^k(X_i^*)] + \sum_{j=1}^{Q} x_{0j}^* \bar{U}_j$$

$$=\sum_{i=1}^{n} X_i^* U^* + \sum_{j=1}^{Q} x_{0j}^* \bar{U}_j \tag{2.13}$$

2.3.3 on-trip 情報提供の場合

ドライバーに on-trip 情報のみが提供される場合を考える．ドライバーがトリップを行なうか否かを決定する時点では状況 k の生起状態は判らないが，経路選択の時点では状況の生起状態は判明する．一度，トリップを生成したドライバーは，on-trip 情報を得たのちにトリップをとりやめる（自宅へ引き返す）ことはないと考える．トリップの生成段階では状況 k の値を知ることはできないため，トリップの発生総数は状況 k の如何を問わず一定値をとる．一方，ドライバーは経路選択の直前には各状況の生起状態を知ることができるので，各状況ごとに以下のネットワーク均衡が成立する．状態 k の下で経路 i を利用するタイプ j の交通量を x_{ij}^k とすれば，on-trip 情報下でのネットワーク均衡 (EO) は次式のように表せる．

$$c_i^k(X_i^k) = U_j^k, \quad if \quad x_{ij}^k > 0 \tag{2.14}$$

$$c_i^k(X_i^k) \geq U_j^k, \quad if \quad x_{ij}^k = 0 \tag{2.15}$$

$$E[U_j^k] = \bar{U}_j, \quad if \quad x_{0j} > 0 \tag{2.16}$$

$$E[U_j^k] \leq \bar{U}_j \quad if \quad x_{0j} = 0 \tag{2.17}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij}^k + x_{0j} = M_j, \quad x_{ij}^k \geq 0, \quad x_{0j} \geq 0 \tag{2.18}$$

$$(i = 1, \cdots, n; j = 1, \cdots, Q; k = 1, \cdots, K)$$

ここに，U_j^k は状況 k の時に成立するタイプ j の均衡費用水準，$X_i^k = \sum_j x_{ij}^k$ は状況 k が生起した時の経路 i の交通量である．式 (2.14)，(2.15) は各状況ごとに経路間，タイプ間の等費用原則が成立することを表す．ドライバーはトリップを生成するか否かを決定する段階では，状況 k の生起状態を知ることができないため，トリップを行なうことによる期待費用 $E[U_j^k] = \sum_{k=1}^{K} \pi^k U_j^k$ に基づいてトリップ生成の有無を決定している．このため，式 (2.17) では保留費用 $\bar{U}_j$ は状況に依存しない．式 (2.17) は期待費用が保留費用より小さい限りトリップを生成するインセンティブを有することを表す．ネットワーク均衡 EO におけるドライバーの総費用 W_{EO} は

$$W_{EO} = E\left[\sum_{i=1}^{n} X_i^{k^{**}} c_i^k(X_i^{k^{**}})\right] + \sum_{j=1}^{Q} x_{0j}^{**} \bar{U}_j \tag{2.19}$$

と表せる．ここに，$X_i^{k^{**}}, x_{0j}^{**}$ は状況ごとの均衡経路交通量，均衡保留需要を表す．

2.3.4 pre-trip 情報提供の場合

pre-trip 情報を獲得したドライバーは，トリップ生成時点の状況の生起状態を知ることができるため，状況のそれぞれに対応して1）トリップを取りやめるか，2）トリップを行なうとすればどの経路を利用するかを同時に決定することができる．pre-trip 情報下でのネットワーク均衡 (EP) は

$$c_i^k(X_i^k) = U_j^k, \quad if \quad x_{ij}^k > 0 \tag{2.20}$$

$$c_i^k(X_i^k) \geq U_j^k, \quad if \quad x_{ij}^k = 0 \tag{2.21}$$

$$U_j^k = \bar{U}_j \quad if \quad x_{0j}^k > 0 \tag{2.22}$$

$$U_j^k \leq \bar{U}_j \quad if \quad x_{0j}^k = 0 \tag{2.23}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij}^k + x_{0j}^k = M_j, \quad x_{ij}^k \geq 0, \quad x_{0j}^k \geq 0 \tag{2.24}$$

$$(i = 1, \cdots, n; j = 1, \cdots, Q; k = 1, \cdots, K)$$

と表せる．x_{0j}^kは状況kの下におけるタイプjの保留需要である．式 (2.20),(2.21) より，pre-trip 情報が与えられた時，各状況，各経路の間に等費用原則が成立する．さらに，式 (2.22) より保留需要が存在する場合には状況間の等費用原則が成立する．ネットワーク均衡EPにおけるドライバーの総費用W_{EP}は，

$$W_{EP} = E\left[\sum_{i=1}^{n} X_i^{k^{***}} c_i^k(X_i^{k^{***}}) + \sum_{j=1}^{Q} x_{0j}^{k^{***}} \bar{U}_j\right] \tag{2.25}$$

と表せる．ここに，$X_i^{k^{***}}, x_{0j}^{k^{***}}$ は状況kの下での均衡経路交通量，均衡保留需要を表す．

2.4 総期待費用最小化配分の定式化

2.4.1 情報提供なしの場合

混雑という外部不経済性が存在する時，各ドライバーの自由な経路選択により実現されるネットワーク均衡がパレート最適となる保証はない．混雑料金の課徴を通じて効率的な交通量配分を達成する問題を考える．そこで，各ドライバーの総期待費用を最小にする問題 (PN) を考える．

$$\min_{x_{ij}, x_{0j}} \sum_{j=1}^{Q} \left\{ \sum_{i=1}^{n} x_{ij} E[c_i^k(X_i)] + x_{0j}\bar{U}_j \right\} \tag{2.26}$$

$$\text{subject to} \quad eq.(2.12)$$

この問題の最適化条件は式(2.10),(2.11),(2.12)，及び

$$E[c_i^k] + X_i E[c_i^{k\prime}] = U_j, \quad if \quad x_{ij} > 0 \tag{2.27}$$

$$E[c_i^k] + X_i E[c_i^{k\prime}] \geq U_j, \quad if \quad x_{ij} = 0 \tag{2.28}$$

で表せる．なお，$E[c_i^k] = \sum_{k=1}^{K} \pi^k c_i^k(X_i)$，$E[c_i^{k\prime}] = \sum_{k=1}^{K} \pi^k \, dc_i^k(X_i)/dX_i$である．式(2.27),(2.28)の左辺第2項は，経路iの交通量が1台増加した場合にその経路を利用する全ての利用者の期待費用水準に及ぼす外部効果である．最適な交通量配分は，このような外部効果を内部化できるような混雑料金

$$\tau_i = X_i E[c_i^{k\prime}] \tag{2.29}$$

を各経路で徴収することにより分権的に達成される．混雑料金はドライバーから交通管理主体への所得移転である．したがって，混雑料金は総社会的費用には計上されない．混雑料金(2.29)が課徴された時に達成される総社会的費用W_{PN}は次式で表される．

$$W_{PN} = \sum_{i=1}^{n} X_i^{\circ} E[c_i^{k^{\circ}}] + \sum_{j=1}^{Q} x_{0j}^{\circ} \bar{U}_j \tag{2.30}$$

ただし，X_i°，x_{0j}°はそれぞれ問題PNの最適解，$E[c_i^{k^{\circ}}] = \sum_{k=1}^{K} \pi^k c_i^k(X_i^{\circ})$である．また，ドライバーが負担する総費用$V_{PN}$を次式で表す．

$$V_{PN} = \sum_{i=1}^{n} X_i^{\circ} \{E[c_i^{k^{\circ}}] + \tau_i\} + \sum_{j=1}^{Q} x_{0j}^{\circ} \bar{U}_j \tag{2.31}$$

2.4.2 on-trip 情報提供の場合

on-trip 情報を提供する場合，ドライバーはトリップ生成時点では未知であった状況kの生起状態を経路選択時点で把握できる．このとき，変動料金が経路選択時点で提示されれば，これは交通情報としての役割を果たす．この時，保留需要を除いた各経路の交通量が状況に応じて配分される．ここに以下の問題(PO)を定式化する．

$$\min_{x_{ij}^k, x_{0j}} \sum_{j=1}^{Q} \left\{ E\left[\sum_{i=1}^{n} x_{ij}^k c_i^k(X_i^k) \right] + x_{0j} \bar{U}_j \right\} \tag{2.32}$$
$$\text{subject to } eq.(2.18)$$

最適化条件は式(2.16),(2.17),(2.18)および

$$c_i^k + X_i^k c_i^{k\prime} = U_j^k \quad if \quad x_{ij}^k > 0 \tag{2.33}$$

$$c_i^k + X_i^k c_i^{k\prime} \geq U_j^k \quad if \quad x_{ij}^k = 0 \tag{2.34}$$

で表される．ただし，$c_i^k = c_i^k(X_i^k)$，$c_i^{k\prime} = dc_i^k/dX_i^k$である．状況$k$の下でトリップ生成後に要するタイプ$j$のドライバーの走行費用を$U_j^k$とする．$U_j^k$は内生的に決まる．このような交通量配分を分権的に達成するためには，その時の交通状況に応じた変動料金

$$\tau_i^k = X_i^k c_i^{k\prime} \tag{2.35}$$

を経路選択の時点で提示すればよい．on-trip情報下における総期待費用最小化配分の下で達成される社会的総費用W_{PO}は

$$W_{PO} = \sum_{i=1}^{n} E\left[X_i^{k\circ\circ} c_i^{k\circ\circ}\right] + \sum_{j=1}^{Q} x_{0j}^{\circ\circ}\bar{U}_j \tag{2.36}$$

で評価される．ここに，$X_i^{k\circ\circ}, x_{0j}^{\circ\circ}$は問題$PO$の最適経路交通量，最適保留需要である．また，$c_i^{k\circ\circ} = c_i^k(X_i^{k\circ\circ})$である．さらに，ドライバーが負担する総費用$V_{PO}$は次式のようになる．

$$V_{PO} = \sum_{i=1}^{n} E\left[X_i^{k\circ\circ}(c_i^{k\circ\circ} + \tau_i^k)\right] + \sum_{j=1}^{Q} x_{0j}^{\circ\circ}\bar{U}_j \tag{2.37}$$

2.4.3 pre-trip情報提供の場合

pre-trip情報を提供する場合，ドライバーはトリップ生成時点で状況kの生起状態を把握できるため，状況に応じてトリップ生成および経路選択に関する意思決定を行う．このときトリップ生成時点で状況kに応じた変動料金が提示されれば，これはon-trip情報と同様に交通情報としての役割を果たす．この場合，保留需要も状況に応じて配分される．ここに，問題(PP)を定式化する．

$$\min_{x_{ij}^k, x_{0j}^k} \sum_{j=1}^{Q}\left\{E\left[\sum_{i=1}^{n} x_{ij}^k c_i^k(X_i^k) + x_{0j}^k\bar{U}_j\right]\right\}$$
$$\text{subject to} \quad eq.(2.24)$$

x_{0j}^kは状況kが生起した時のタイプjのドライバーの保留需要である．このとき1階の最適化条件は式(2.22),(2.23),(2.24)及び(2.33),(2.34)で表される．混雑料金τ_i^kはon-trip情報の場合と同様に式(2.35)を解くことにより求められる．混雑料金が課徴された場合の社会的総費用W_{PP}は

$$W_{PP} = E\left[\sum_{i=1}^{n} X_i^{k\circ\circ\circ} c_i^{k\circ\circ\circ} + \sum_{j=1}^{Q} x_{0j}^{k\circ\circ\circ}\bar{U}_j\right] \tag{2.38}$$

となる．ここに，$X_i^{k\circ\circ\circ}, x_{0j}^{k\circ\circ\circ}$は問題$PP$の最適経路交通量，最適保留需要である．ドライバーが負担する総費用V_{PP}は次式で表わされる．

$$V_{PP} = E\left[\sum_{i=1}^{n} X_i^{k\circ\circ\circ}(c_i^{k\circ\circ\circ} + \tau_i^k) + \sum_{j=1}^{Q} x_{0j}^{k\circ\circ\circ}\bar{U}_j\right] \tag{2.39}$$

2.5　社会的総費用の比較

すべてのドライバーが同質であり，保留費用がすべて等しい場合を考える．ネットワーク均衡 EN, EO, EPにおいて達成される社会的総費用W_{EN}, W_{EO}, W_{EP}及び，総期待費用最小化問題 PN, PO, PPにおいて達成されるドライバーの負担する費用 V_{PN}, V_{PO}, V_{PP}をそれぞれ比較してみよう．すなわち，ドライバーのタイプが１種類($Q=1$)であり，ドライバーの総数M_1が十分に大きい（ドライバーの保留需要が正となる）場合を考える．この時，以下の命題が成立する（付録参照）．

[命題１]　$Q=1$**で保留需要が存在する場合，ネットワーク均衡の社会的費用と総期待費用最小化配分のドライバーの負担費用の間には，**$W_{EN}=W_{EO}=W_{EP}=V_{PN}=V_{PO}=V_{PP}$**が成立する．**

命題１はすべてのドライバーが同一の選好を持ち，かつドライバーの一部が自由にトリップを行うか否かを選択できる（保留交通需要が存在する）場合には，交通情報の提供や混雑料金の課徴を行ってもドライバーの総厚生を変化させることはできないことを主張している．もちろん，６．で示すように，それぞれのネットワーク均衡において配分結果や保留交通量は異なった値をとる．なお，ネットワーク均衡EN, EO, EPのいずれかにおいて保留需要が存在しない場合には命題１は成立しない．特に，すべてのケースにおいて保留需要が存在しない（すべてのドライバーが義務的トリップを行う）場合，交通情報は交通需要の制御効果をもたずネットワーク均衡EO，EPは一致する．保留需要が存在しない（すべてのドライバーが義務的トリップを行う）場合，文等[5)]が詳細に考察しているように，命題１は成立せず交通情報の提供や混雑料金の課徴により社会的費用やドライバーの総負担費用は変化する．

交通情報や混雑料金が交通需要管理効果を持つためには，情報や料金の内容によりトリップの生成をとりやめたり，逆にトリップを生成するようなドライバーが存在するような弾力的なトリップ生成が不可欠である．いま，ドライバーのタイプが複数（$Q\geq 2$）存在する場合を考える．異質性の仮定（２）よりドライバーの保留費用はドライバーのタイプを表す添字jに関して単調に減少することに着目しよう．ネットワーク均衡ENを考えれば，

$$\begin{aligned}\bar{j}_{EN} = \arg\{&x^*_{0j}=0\ (j=1,\cdots,\bar{j}-1), x^*_{0\bar{j}}\geq 0,\\ &\text{and } x^*_{0l}=M_l\ (l=\bar{j}+1,\cdots,Q)\}\end{aligned} \tag{2.40}$$

となるような臨界タイプ$\bar{j}_{EN}$が存在する．ここに記号$\arg\{\cdot\}$は括弧内が成立するような添字を指

示する記号である．臨界タイプより保留費用の高いタイプ$j(j=1,\cdots,\bar{j}-1)$のドライバーは全員トリップを生成し，保留費用の低いタイプ$l(l=\bar{j}+1,\cdots,Q)$のドライバーは全員トリップを保留する．同様に，ネットワーク均衡EO, EPに対して

$$\begin{aligned}
\bar{j}_{EO} &= \arg\{x^{**}_{0j}=0\ (j=1,\cdots,\bar{j}-1),\ x^{**}_{0\bar{j}}\geq 0,\\
&\quad \text{and } x^{**}_{0l}=M_l\ (l=\bar{j}+1,\cdots,Q)\}
\end{aligned} \tag{2.41}$$

$$\begin{aligned}
\bar{j}^{k}_{EP} &= \arg\{x^{k***}_{0j}=0\ (j=1,\cdots,\bar{j}-1),\ x^{k***}_{0\bar{j}}\geq 0\\
&\quad \text{and } x^{k***}_{0l}=M_l\ (l=\bar{j}+1,\cdots,Q)\}
\end{aligned} \tag{2.42}$$

を定義する．$Q\geq 2$の場合にも，命題1と同様に以下の系が成立する（付録参照）．

[系]　**$Q\geq 2$の場合にも，以下の条件が成立すれば，ネットワーク均衡ENに対して，on-trip情報，pre-trip情報はドライバーの総費用を変化させない．**

$$\left.\begin{array}{l} x^{*}_{0\bar{j}_{EN}}<M_{\bar{j}_{EN}}, x^{**}_{0\bar{j}_{EO}}<M_{\bar{j}_{EO}}\\ \bar{j}_{EN}=\bar{j}_{EO}\end{array}\right\} \tag{2.43}$$

$$\left.\begin{array}{l} x^{*}_{0\bar{j}_{EN}}<M_{\bar{j}_{EN}}, x^{***}_{0\bar{j}_{EP}}<M_{\bar{j}_{EP}}\\ \bar{j}_{EN}=\bar{j}^{k}_{EP}\ (k=1,\cdots,K)\end{array}\right\} \tag{2.44}$$

また，総期待費用最小化配分に関しても，以下の条件が成立すれば，ネットワーク均衡ENに対して，混雑料金は社会的総費用を変化させない．

$$\left.\begin{array}{l} x^{*}_{0\bar{j}_{EN}}<M_{\bar{j}_{EN}}, x^{\circ}_{0\bar{j}_{PN}}<M_{\bar{j}_{PN}}\\ \bar{j}_{EN}=\bar{j}_{PN}\end{array}\right\} \tag{2.45}$$

$$\left.\begin{array}{l} x^{*}_{0\bar{j}_{EN}}<M_{\bar{j}_{EN}}, x^{\circ\circ}_{0\bar{j}_{PO}}<M_{\bar{j}_{PO}}\\ \bar{j}_{EN}=\bar{j}_{PO}\end{array}\right\} \tag{2.46}$$

$$\left.\begin{array}{l} x^{*}_{0\bar{j}_{EN}}<M_{\bar{j}_{EN}}, x^{\circ\circ\circ}_{0\bar{j}_{PP}}<M_{\bar{j}_{PP}}\\ \bar{j}_{EN}=\bar{j}^{k}_{PP}\ (k=1,\cdots,K)\end{array}\right\} \tag{2.47}$$

この系は，交通情報や混雑料金により社会的総費用が変化するためには，臨界タイプのドライバーの保留需要がゼロになるか，臨界タイプが異なることが必要となることを主張している．なお，以上の議論は時間価値wがすべてのタイプのドライバーを通じて一定であるという仮定に依存している．時間価値の異質性を認めた場合，どのタイプのドライバーがトリップを生成するかは添字jの大きさとは単調に対応せず，ネットワーク均衡の状態に応じて多様に変化する．しかし，交通情報や混雑料金を課徴しても保留需要が正となるような臨界的なドライバーのタイプが変化しなければ社会的総費用は変化しない．このことは系の証明が効用関数の形に依存していないことから明らかである．つぎに総期待費用最小化配分に関して以下の命題が成立する（付録参照）．

[命題2]　ネットワーク均衡の社会的総費用 W_{EN}，W_{EO}，W_{EP}の間の関係は一意に決まらない．総期待費用最小化配分の社会的費用の間には$W_{PN} \geq W_{PO} \geq W_{PP}$が成立する．ネットワーク均衡と総期待費用最小化配分の社会的費用の間には$W_{EN} \geq W_{PN}$，$W_{EO} \geq W_{PO}$，$W_{EP} \geq W_{PP}$が成立する．

命題の前半は，交通情報の提供により社会的総費用が必ずしも減少しない場合がありうることを主張している．このことは，交通情報システムの導入により社会的総費用を減少しうるという期待を裏切るものである．on-trip 情報，pre-trip 情報が提供される場合，等費用配分が達成される．周知のとおり，等費用配分が社会的最適となる保証がないことを考えれば，交通情報の提供が必ずしも社会的総費用のパレート改善をもたらすとは限らないことは当然の結果であると言えよう．この命題の前半が成立することはのちに数値計算事例で示す．一方，命題の後半は混雑料金を課徴することにより，常にネットワーク均衡より社会的総費用が減少することを示している．このことは，ネットワーク均衡EN, EO, EPの間では社会的総費用の大小関係が一意的に決まらなかったことと対照的である．さらに，総期待費用最小化配分の中ではpre-trip 情報による方法がもっとも効果的である．ここで，留意すべきことは，社会的総費用がドライバーの総負担費用と一致しないことである．混雑料金を課徴することによりドライバーの総負担費用は増加する．ドライバーの総負担費用を増加させないためには，課徴した混雑料金をドライバーに還付する必要がある．還付の方法は種々あるが，例えば混雑料金収入の総額をトリップを生成したドライバーに均等割で還付する方法を考える．このような方法で，ドライバーに混雑料金が還付されたときのドライバーの総負担費用を$V'_{PN}, V'_{PO}, V'_{PP}$とする．ドライバーが危険中立的な場合，混雑料金収入をドライバー間で配分する方法を変えても，ドライバーの総負担費用は変化しない．ここに，次の命題が成立する（付録参照）．

[命題3]　総期待費用最小化配分の社会的総費用とドライバーが負担する費用の間には，$V_{PN} \geq W_{PN}$，$V_{PO} \geq W_{PO}$，$V_{PP} \geq W_{PP}$が成立する．混雑料金の総収入をトリップ生成したドライバーに還付する場合には$V'_{PN} = W_{PN}$，$V'_{PO} = W_{PO}$，$V'_{PP} = W_{PP}$が成立する．さらに，$Q \geq 2$，かつ混雑料金がドライバーに還付される時，ドライバーの総負担費用の間には$V'_{PN} \geq V'_{PO} \geq V'_{PP}$が成立する．また$W_{EN} \geq V'_{PN}$，$W_{EO} \geq V'_{PO}$，$W_{EP} \geq V'_{PP}$が成立する．

命題3の後半部分は，混雑料金がトリップを生成したドライバーに還付されれば，変動料金制度の導入によりドライバーの負担費用は必ず減少し，しかもpre-trip 課徴方式によりドライバーが負担する総費用は最小化できることを主張している．以上の命題の証明は効用関数の形に依存し

表－1　道路ネットワークの経路特性

ネットワーク 1	ネットワーク 2
$t_1^1 = 2.0 + 10.0 \times 10^{-6} X_1^{1^2}$	$t_1^1 = 2.0 + 10.0 \times 10^{-6} X_1^{1^2}$
$t_2^1 = 3.0 + 6.0 \times 10^{-6} X_2^{1^2}$	$t_2^1 = 3.0 + 1.0 \times 10^{-6} X_2^{1^2}$
$t_1^2 = 2.0 + 5.0 \times 10^{-6} X_1^{2^2}$	$t_1^2 = 2.0 + 5.0 \times 10^{-6} X_1^{2^2}$
$t_2^2 = 3.0 + 3.0 \times 10^{-6} X_2^{2^2}$	$t_2^2 = 3.0 + 0.5 \times 10^{-6} X_2^{2^2}$

ておらず，時間価値wの異質性を認めても同様に成立する．

なお，以上の議論はドライバーがすべて危険中立的であるという仮定の下に成立する．危険回避選好を有する場合には，文等[5]が示したように$V'_{PN} = W_{PN}$, $V'_{PO} = W_{PO}$, $V'_{PP} = W_{PP}$が成立する保証はない．もちろん，ドライバーの危険回避選好を考慮したような混雑料金の設計とその性質について考察することは可能である．しかし，ドライバーのタイプはドライバー本人のみが知り得る私的情報であり，交通管理者がそれを知ることはできない．ドライバーの危険回避選好の異質性に応じて混雑料金を差別化するためには，自己選抜メカニズム[14]を考慮したような料金体系の設計が必要となろう．また，以上の結論は１ＯＤ，並行ネットワークを対象として導出されたものである．一般のネットワークにおいて，同様の結果が得られるかどうかに関しては今後の研究課題としたい．

2.6　数値計算事例

2.6.1　問題設定

本数値計算では，数値計算を通じて命題の内容について確認するとともに，命題２の前半部分が成立することを数値事例により示すこととする．いま，トリップ生成地点Ａと目的地Ｂを結ぶ２本の代替経路を有する道路ネットワークを対象とし，その２地点間の潜在的な総交通需要を$M = 3000$とする．計算ケースとして，１）同質なドライバーのみを想定した場合（*Case A*），２）２種類のタイプのドライバーを想定した場合（*Case B*, *Case C*）をとりあげる．その際，各タイプのドライバーの総数は$M_1 = 1000, M_2 = 2000$とする．保留費用水準を$\bar{U}_1 = 5.0, \bar{U}_2 = 4.5$とする．交通状況の数を$K = 2$とし，状況の生起確率を$(\pi^1, \pi^2) = (0.5, 0.5)$とする．一般化走行費用関数は式(5)で表し，各経路の走行費用を$(p_1, p_2) = (1.0, 1.2)$，時間価値を$w = 1.0$とする．ここで，走行時間関数を$t_i^k(X_i) = \alpha_i^k X_i^2 + \beta_i$と特定化する．$\alpha_i^k$は混雑度を表すパラメータ，$\beta_i$は状況に無関係な各経路の走行時間を表す．本事例では，**表－1**に示すように，走行時間関数が異

表－2　配分結果($Case\ A$)

ネットワーク均衡							
問題	発生交通需要		保留需要	混雑料金		総費用水準	
情報なし	X_1	X_2	x_{01}	-	-	W_{EN}	
EN	515.6	418.9	2065.5	-	-	15000	
	X_1^1	X_2^1		-	-		
on-trip	489.7	446.4	x_{01}	-	-	W_{EO}	
EO	X_1^2	X_2^2	2063.9	-	-	15000	
	567.7	368.4		-	-		
	X_1^1	X_2^1	x_{01}^1	-	-		
pre-trip	448.3	366.2	2185.5	-	-	W_{EP}	
EP	X_1^2	X_2^2	x_{01}^2	-	-	15000	
	633.9	518.7	1847.4	-	-		
総期待費用最小化配分							
問題	発生交通需要		保留需要	混雑料金		総費用水準	
情報なし	X_1	X_2	x_{01}	τ_1	τ_2	W_{PN}	V_{PN}
PN	298.3	243.4	2458.3	1.33	0.53	14473	15000
	X_1^1	X_2^1		τ_1^1	τ_2^1		
on-trip	282.5	257.3	x_{01}	1.60	0.79	W_{PO}	V_{PO}
PO	X_1^2	X_2^2	2460.2	τ_1^2	τ_2^2	14468	15000
	327.1	212.7		1.07	0.27		
	X_1^1	X_2^1	x_{01}^1	τ_1^1	τ_2^1		
pre-trip	257.6	201.4	2533.0	1.33	0.53	W_{PP}	V_{PP}
PP	X_1^2	X_2^2	x_{01}^2	τ_1^2	τ_2^2	14448	15000
	365.8	298.5	2335.6	1.33	0.53		

なる２種類のネットワークを想定するが，いずれのネットワークにおいても経路１の方が経路２よりも走行距離は短いが混雑しやすいような経路を想定している．

2.6.2　計算結果の考察

2.6.3　ドライバーのタイプが同質な場合

表－２は，ネットワーク１におけるネットワーク均衡，総期待費用最小化配分の結果（上表がネットワーク均衡モデル，下表が総期待費用最小化配分モデルの結果と対応する）を示している．同表より，本ケース（$Case\ A$）では，$W_{EN} = W_{EO} = W_{EP} = V_{PN} = V_{PO} = V_{PP}$（命題１）が成立していることを確認できる．つまり，ドライバーのタイプが同一で保留需要が存在する場合，交通情報の提供や混雑料金の課徴がドライバーの総厚生水準を変化させないことを示している．ただし，配分結果や保留交通量は各問題の間で異なった値をとっている．

表－3　配分結果 ($Case\ B$)

ネットワーク均衡								
問題	発生交通需要		保留需要		混雑料金		総費用水準	
情報なし	X_1	X_2	x_{01}	x_{02}	-	-	W_{EN}	
EN	516.4	421.8	61.8	2000.0	-	-	14000	
	X_1^1	X_2^1			-	-		
on-trip	489.2	445.8	x_{01}	x_{02}	-	-	W_{EO}	
EO	X_1^2	X_2^2	65.0	2000.0	-	-	13999	
	566.5	368.4			-	-		
	X_1^1	X_2^1	x_{01}^1	x_{02}^1	-	-		
pre-trip	447.5	365.2	187.3	2000.0	-	-	W_{EP}	
EP	X_1^2	X_2^2	x_{01}^2	x_{02}^2	-	-	13858	
	585.7	414.3	0	2000.0	-	-		

総期待費用最小化配分								
問題	発生交通需要		保留需要		混雑料金		総費用水準	
情報なし	X_1	X_2	x_{01}	x_{02}	τ_1	τ_2	W_{PN}	V_{PN}
PN	298.2	243.6	458.3	2000.0	1.33	0.53	13473	14000
	X_1^1	X_2^1			τ_1^1	τ_2^1		
on-trip	282.5	257.4	x_{01}	x_{02}	1.60	0.80	W_{PO}	V_{PO}
PO	X_1^2	X_2^2	460.1	2000.0	τ_1^2	τ_2^2	13468	14000
	327.3	212.7			1.07	0.27		
	X_1^1	X_2^1	x_{01}^1	x_{02}^1	τ_1^1	τ_2^1		
pre-trip	258.0	210.8	531.3	2000.0	1.33	0.53	W_{PP}	V_{PP}
PP	X_1^2	X_2^2	x_{01}^2	x_{02}^2	τ_1^2	τ_2^2	13449	14000
	365.2	298.2	336.5	2000.0	1.33	0.53		

2.6.4　ドライバーのタイプが異質な場合

ネットワーク１（$Case\ B$），ネットワーク２（$Case\ C$）における計算結果をそれぞれ**表－３**，**表－４**に示している．**表－３**に示すように，$Case\ B$では$W_{EN} > W_{EO} > W_{EP}$が成立し，ネットワーク均衡におけるドライバーの総費用水準は情報提供によって低減している．それに対し，**表－４**では$W_{EN} = W_{EO} < W_{EP}$が成立しており，on-trip 情報を提供した場合には情報提供のない場合と変わらないが，pre-trip 情報の提供によってドライバーの総費用水準が逆に増加している．これより，ネットワーク均衡の社会的総費用の間の関係が一意に決まらないこと（命題２の前半部分）を確認できる．on-trip 情報の提供によりドライバーの厚生水準が低下する事例に関しては，参考文献[1)5)]を参照して欲しい．

一方，総期待費用最小化配分モデルの場合は，**表－３**，**表－４**ともに$W_{PN} \geq W_{PO} \geq W_{PP}$が成立しており交通情報の提供により総費用水準が低減している．また，それぞれの配分モデルの

表－4　配分結果($Case\ C$)

ネットワーク均衡								
問題	発生交通需要		保留需要		混雑料金		総費用水準	
情報なし	X_1	X_2	x_{01}	x_{02}	-	-	W_{EN}	
EN	447.1	631.0	0	1921.9	-	-	13499	
	X_1^1	X_2^1			-	-		
on-trip	405.7	668.1	x_{01}	x_{02}	-	-	W_{EO}	
EO	X_1^2	X_2^2	0	1926.2	-	-	13499	
	520.3	553.6			-	-		
	X_1^1	X_2^1	x_{01}^1	x_{02}^1	-	-		
pre-trip	395.2	604.8	0	2000.0	-	-	W_{EP}	
EP	X_1^2	X_2^2	x_{01}^2	x_{02}^2	-	-	13547	
	551.1	805.3	0	1643.7	-	-		

総期待費用最小化配分								
問題	発生交通需要		保留需要		混雑料金		総費用水準	
情報なし	X_1	X_2	x_{01}	x_{02}	τ_1	τ_2	W_{PN}	V_{PN}
PN	298.1	596.7	105.2	2000.0	1.33	0.53	13284	14000
	X_1^1	X_2^1			τ_1^1	τ_2^1		
on-trip	278.8	614.1	x_{01}	x_{02}	1.55	0.75	W_{PO}	V_{PO}
PO	X_1^2	X_2^2	107.1	2000.0	τ_1^2	τ_2^2	13279	14000
	333.6	559.3			1.11	0.31		
	X_1^1	X_2^1	x_{01}^1	x_{02}^1	τ_1^1	τ_2^1		
pre-trip	257.7	513.6	228.8	2000.0	1.33	0.53	W_{PP}	V_{PP}
PP	X_1^2	X_2^2	x_{01}^2	x_{02}^2	τ_1^2	τ_2^2	13256	13914
	349.5	650.5	0	2000.0	1.22	0.42		

社会的総費用の間では$W_{EN} \geq W_{PN}, W_{EO} \geq W_{PO}, W_{EP} \geq W_{PP}$が成立している．これは，混雑料金の課徴により常にネットワーク均衡の社会的総費用が減少すること（命題2の後半部分）を示している．そして，命題3の後半部分$V_{PN} \geq V_{PO} \geq V_{PP}$の成立も**表－4**より確認できる．さらに，混雑料金収入の全額をドライバーに還付した時，$W_{PN} = V'_{PN}, W_{PO} = V'_{PO}, W_{PP} = V'_{PP}$が成立することに留意すれば，**表－3**，**表－4**から$V_{PN} \geq W_{PN}, V_{PO} \geq W_{PO}, V_{PP} \geq W_{PP}$及び，$W_{EN} \geq V'_{PN}, W_{EO} \geq V'_{PO}, W_{EP} \geq V'_{PP}$（命題3の残りの部分）が成立することも確認できる．

2.7　おわりに

本研究ではon-trip情報，pre-trip情報が提供された場合におけるネットワーク均衡問題を定式化するとともに，交通情報の提供によるドライバーの総負担費用の改善効果について比較検討した．その結果，pre-trip情報と変動混雑料金を併用することにより必ずドライバーの総負担費用を

最小化できることを明らかにした．当然のことながら，以上で得られた結論は，１）１ＯＤ・並行リンクという簡単なネットワークを採用している，２）情報システムの導入・管理費用を無視している，３）トリップの生成時刻の変更可能性を無視している，という極めて単純化された仮定の下でのみ成立する事項である．今後，より一般的なネットワークを対象としても同様の命題が成立するかどうかを検討する必要があろう．また，交通情報が出発時刻の決定に及ぼす影響を検討する場合には，動学的な分析枠組みが必要となろう．さらに，本研究では交通管理者が完全情報を提供する場合を想定していた．しかし，現実には交通情報はノイズを含んでいる．このような不完全情報の下での交通需要の誘導方策に関する研究も今後に残された課題となっている．

付録　命題の証明

[命題１・系]　問題ENを考える．$Q = 1$で保留需要が存在するから式(2.10)より$U_1 = \bar{U}_1$が成立．保留ドライバーが存在する限り，均衡費用水準は保留費用に等しく，$E[c_i^k(X_i)]= \bar{U}_1$となる．$W_{EN}= \sum_{i=1}^n X_i^* \bar{U}_1 + x_{01}^* \bar{U}_1 = \bar{U}_1(\sum_{i=1}^n X_i^* + x_{01}^*) = \bar{U}_1 M_1$．問題$EO$では，$W_{EO}= \sum_{k=1}^K \pi^k \sum_{i=1}^n X_i^{k^{**}}\ c_i^k(X_i^{k^{**}}) + x_{01}^{**}\bar{U}_1 = \sum_{k=1}^K \pi^k U_1^k \sum_{i=1}^n X_i^{k^{**}} + x_{01}^{**}\bar{U}_1 = \sum_{k=1}^K \pi^k U_1^k\ (M_1 - x_{01}^{**}) + x_{01}^{**}\bar{U}_1 = \bar{U}_1 M_1$が成立．社会的総費用$W_{EP}$, V_{PN}, V_{PO}, V_{PP}についても同様．どの問題についても保留費用，総交通需要は一定であり総社会的費用は常に一定．よって，$W_{EN} = W_{EO} = W_{EP} = V_{PN} = V_{PO} = V_{PP}$が成立．系に関しても臨界タイプの保留費用を$\bar{U}_1$と考えれば同様の議論が成立する．

[命題２]　$W_{PN} \geq W_{PO}$を示す．$T_k = \sum_{i=1}^n X_i^k\ c_i^k(X_i^k) + \sum_{j=1}^Q x_{0j}\bar{U}_j$を定義する．問題$PO$の最適解$(X_i^{k^{\circ\circ}}, x_{0j}^{\circ\circ})$に対して$T_k^{\circ\circ} = \sum_{i=1}^n X_i^{k^{\circ\circ}}\ c_i^k(X_i^{k^{\circ\circ}}) + \sum_{j=1}^Q x_{0j}^{\circ\circ}\bar{U}_j$を定義する．変数$X_i^{1^\circ} = X_i^{2^\circ} = X_i^\circ$を定義すれば$X_i^{1^\circ}, X_i^{2^\circ}$は式(18)を満足する．したがって問題$PO$の解は問題$PN$の実行可能解である．$(X_i^{k^{\circ\circ}}, x_{0j}^{\circ\circ})$が$\sum_{k=1}^K \pi^k T_k$を最小にすることにより，$W_{PO} = \sum_{k=1}^K \pi^k T_k^{\circ\circ} \leq \sum_{k=1}^K \pi^k T_k^\circ = W_{PN}$が成立することがわかる．ただし，$T_k^\circ = \sum_{i=1}^n X_i^\circ c_i^k(X_i^\circ) + \sum_{j=1}^Q x_{0j}^\circ \overline{U}_j$である．同様に，問題$PO$の解は問題$PP$の実行可能解である．問題$PP$において$T_k^{\circ\circ\circ} = \sum_{i=1}^n X_i^{k^{\circ\circ\circ}}\ c_i^k(X_i^{k^{\circ\circ\circ}}) + \sum_{j=1}^Q x_{0j}^{k^{\circ\circ\circ}}\bar{U}_j$を定義すれば$W_{PP} = \sum_{k=1}^K \pi^k T_k^{\circ\circ\circ} \leq \sum_{k=1}^K \pi^k T_k^{\circ\circ} = W_{PO}$．つぎに，$W_{EN} \geq W_{PN}$を示す．ネットワーク均衡$EN$の解は問題$PN$の実行可能解に含まれる．問題$PN$は社会的総費用の最小化問題であり，その目的関数の最小値W_{PN}とネットワーク均衡ENの社会的総費用の間には$W_{EN} \geq W_{PN}$が成立．同様にして，$W_{EO} \geq W_{PO}$, $W_{EP} \geq W_{PP}$も成立．

[命題３]　まず，前半部分が成立することを示す．式(2.30),(2.31)より，$W_{PN} + \sum_{i=1}^n X_i^\circ \tau_i = V_{PN}$を得る．$c_i^{k\prime} > 0$より$\tau_i > 0$となる．これにより任意の$X_i$に対して必ず$\sum_{i=1}^n X_i^\circ \tau_i > 0$．よって，$V_{PN}$

$\geq W_{PN}$. 同様に $V_{PO} \geq W_{PO}, V_{PP} \geq W_{PP}$ も成立. ドライバーに混雑料金を還付することにより, V_{PN} $=\sum_{i=1}^{n} X_i^{**}\{E[c_i^{k^{**}}]+\tau_i\}+\sum_{j=1}^{Q} x_{0j}^{**}\bar{U}_j-\sum_{i=1}^{n} X_i^{**}\tau_i=W_{PN}$ が成立する. 同様に, $V_{PO}=W_{PO}, V_{PP}=W_{PP}$ も成立. 前半部分の証明より, 後半部分 ($V'_{PN} \geq V'_{PO} \geq V'_{PP}$, $W_{EN} \geq V'_{PN}$, $W_{EO} \geq V'_{PO}, W_{EP} \geq V'_{PP}$) が成立することは自明.

参考文献

[1] 小林潔司, 文世一, 多々納裕一：交通情報による経路誘導システムの経済便益評価に関する研究, 土木学会論文集, No. 506, pp. 77-86, 1995.

[2] 文世一, 小林潔司, 安野貴人：価格情報による経路誘導に関する理論的研究, 土木学会論文集, No. 562, pp. 57-67, 1997.

[3] Arnott, R., de Palma, A., and Lindsey, R.: Departure time and route choice for the morning commute, *Transportation Research*, Vol.24B, pp. 209-228, 1990.

[4] Walters, A.A.: The theory and measurement of private and social cost of highway congestion, *Econometrica,* Vol. 29, pp. 676-699, 1961.

[5] 文世一: 混雑料金と交通量配分, 土木計画学研究・論文集, No. 11, pp. 113-120, 1993.

[6] d'Ouville, E. L. and McDonald, J. F.: Effects of demand uncertainty on optimal capacity and congestion tolls for urban highways, *Journal of Urban Economics*, Vol. 28, pp. 63-70, 1990.

[7] 山内弘隆, 竹内健蔵: 混雑理論の展望ー経済学の視点, 土木学会論文集, No. 449, pp. 17-26, 1992.

[8] Arnott, R., de Palma A., and Lindsey R.: Does providing information to drivers reduce traffic congestion?, *Transportation Research*, Vol.25A, pp. 309-318, 1991.

[9] 赤松隆, 桑原雅夫: 確率利用者均衡条件下での最適混雑料金, 土木学会論文集, No.389, pp. 121-129, 1988.

[10] Emmerink, R., and Verhoef, E.et al.: Endogenising demand for information in road transport, *The Annals of Regional Science*, Vol.30, pp. 201-222, 1996.

[11] 酒井泰弘: 不確実性の経済学, 有斐閣, 1982.

3　不完全情報下における状況依存的混雑料金に関する理論的研究

3.1　はじめに

Walters[1)]の先駆的な研究以降，混雑料金に関して数多くの研究が蓄積されてきた．その多くは，混雑という外部不経済を内部化し，効率的な道路利用を実現することを目的としている．旅行費用の不確実性を考慮した料金の設定方法や，それが交通需要の水準に及ぼす影響についても分析されている[2)3)]．最近では，混雑の外部不経済がドライバーの経路選択を歪ませる効果が認識され，それを是正するための混雑料金の役割が着目されている[4)]．たとえば，文は確定的ネットワーク均衡モデルにより[5)]，赤松らは確率利用者均衡モデルに基づいて混雑料金を求める方法を提案している[6)]．

一方，混雑料金がネットワークの状況に応じて変化する場合，その情報が事前にドライバーに通知されれば交通情報としての役割を演じる．このような状況依存的な混雑料金の下でのネットワーク均衡に関してはEmmerinkらが体系的な研究を実施した[7)]．また，それとは独立に文等も同様の研究を実施している[8)]が，そこではドライバーの危険回避行動も同時に考慮しており，より一般的な内容となっている．また，太田らは情報の提供のタイミングとドライバーの異質性を考慮したネットワーク均衡モデルを提案している[9)]．

以上の研究はいずれも交通管理者が状況の生起に関して完全情報を有することを前提になされたものである．しかし，現実には交通管理者が各期におこるであろう道路状況を完全には予測できない．したがって，交通管理者がドライバーに提供する交通情報には誤りや予測誤差が含まれる．このような不完全情報の下で状況依存的混雑料金を導入する場合，混雑料金を課徴するタイミングが問題になってくる．交通状況が確定していない事前の段階で混雑料金を課徴するか，交通状況が確定した事後の時点で課徴するかにより，ドライバーの厚生水準は異なるだろう．すでに，安野等[10)]は，交通管理者が提供する交通情報に不確実性が存在する場合における状況依存的混雑料金の設計方法を提案しているが，混雑料金は事前に課徴されることが前提となっている．著者等の知る限り，状況依存的混雑料金の課徴のタイミングや交通情報の精度とドライバーの厚生状態の関係について分析した研究は見あたらない．

以上の問題意識に基づいて，本研究では，交通管理者が事前に把握する交通状況に不確実性が存在する場合における望ましい状況依存的混雑料金のあり方に関して理論的な分析を試みる．さらに，交通情報の不確実性の減少がドライバーの総厚生水準に及ぼす影響について分析することとする．以下，**3.2** 節で本研究の基本的な考え方を述べ，**3.3** 節では不確実性下でのネットワーク

均衡を，**3.4節**では混雑料金の下でのネットワーク均衡を定式化する．**3.5節**では各ネットワーク均衡の特性について考察し，**3.6節**では数値計算事例を示す．

3.2 分析の枠組み

3.2.1 既存の研究概要

情報システムの精度の向上が家計行動に及ぼす影響に関しては，情報の経済学や意思決定理論の分野を中心に，膨大な研究成果が蓄積されている[11)−16)]．伝統的な意思決定理論においては，個人が直面するリスクは外生的に与えられ，個人行動がリスクを変化させることは考慮してこなかった．そこでは，情報システムは外生的なリスクの生起と相関を持つようなメッセージの集合を意味する．情報精度の高い情報システムは，リスクの生起とより相関の高いメッセージを提供するようなシステムとして定義される．情報経済学の成果によれば，リスクの生起が外生的に与えられる限り，家計の期待効用は必ず増加することが保証される[15)]．ネットワーク均衡問題では，天候や交通需要の変化といった外生的なリスクが走行時間の変動をもたらすが，それにとどまらず，外生的リスクがドライバーの経路選択行動を変化させ，結果的に新たな走行時間の変動を引き起こすこととなる．このように，ネットワーク均衡問題においては外生的リスクが新たな内生的リスクを引き起こすため，情報精度の向上が必ずしもネットワーク均衡の効率性の向上をもたらすとは限らない[5)]．一方，外生的なリスクが市場均衡に及ぼす影響に関しては，不確実性の経済学の分野で研究の蓄積がある[13)−16)]．しかし，ネットワーク均衡においては，通常の市場に見られるような価格メカニズムは存在しない．ネットワークで実現する価格（走行費用）は経路を選択した事後においてはじめて確定する．事前に提供される交通情報は市場価格情報と類似の役割を果たすことが期待される．しかし，生起しうる状況を完全に予測できない場合，交通情報は市場価格のように完全なメッセージをドライバーに提供することはできない．周知のとおり，混雑料金はドライバーの経路利用に伴う外部不経済性を内部化する役割を果たす．また，交通情報は状況の生起に関わる情報をドライバーに伝達する．交通情報が完全であり，ドライバーが走行費用に関する完全な期待を形成すれば交通情報は市場価格と同様の機能を有することになる．しかし，完全情報の提供が困難な場合には，事前になされた選択が結果的に事前の予測とは異なった結果を生み出す可能性がある．事前・事後における最適行動が一致しない場合，事後において現実に生起した状況と対応させて混雑料金を変化させることによりドライバーの厚生状況に変化をもたらす可能性がある．本研究では，このような混雑料金を課徴するタイミングとドライバー

の厚生水準について分析することとする．

3.2.2　混雑料金の課徴のタイミング

ドライバーの経路選択に関わる論理的な時間的な順序関係を，1）交通管理者が交通状況を予測する時点（A），2）交通管理者がドライバーに情報を通達する時点（B），3）ドライバーが選択する経路を決定する時点（C），4）利用した経路の走行条件が確定した時点（D）と定義する[17]．課徴すべき混雑料金をドライバーに通知する時点としては，時点B，Dの２つが考えられる．本研究では前者を事前，後者を事後と呼ぶこととする．以下,「混雑料金を課徴する時点」という用語は，交通管理者が徴収すべき混雑料金を確定しそれをドライバーに通知する時点を意味する．事前に混雑料金が課徴される場合，ドライバーが経路選択を行う以前にそのときどきの各経路の混雑料金が提示され，ドライバーは混雑料金を考慮に入れて経路選択を行うこととなる．通知された混雑料金が，そのまま徴収されるのであれば，実際に混雑料金は事後の時点（例えば，月末に一括して決済するなど）で支払われても問題はない．一方，事後に混雑料金が課徴される場合，交通管理者は事前にドライバーに経路の所要時間と混雑料金の関係を表した混雑料金表を通知しておく．経路選択の時点Cでは，ドライバーは課徴される混雑料金の正確な値は知らない．経路を選択した時点Dにおいて，混雑料金がドライバーに通知される．交通管理者とドライバーは混雑料金表と走行実績に関する知識を共有していれば，交通管理者から通知される混雑料金はドライバーが事後に想定する料金と一致する．

3.2.3　交通情報と状況依存的混雑料金

本研究では，交通情報と状況依存的混雑料金を組み合わせたような経路誘導方策について検討する．状況依存的混雑料金システムとは，そのつどの状況の生起状態に対応して徴収する料金を変化させる方式である．交通情報はドライバーが経路選択を行う事前の時点でドライバーに通知される．状況依存的混雑料金システムには，事前の予測結果に基づいて決定された混雑料金を各期ごとにドライバーに事前に通知する方式（A）と，事後に実際に生起した状況を踏まえて混雑料金を課徴する方式（P）が考えられる．以後，方式Aに基づく混雑料金を事前変動料金と，方式Pによる場合を事後変動料金と呼ぶ．事前変動料金を採用する場合，ドライバーが経路選択を行う前に料金情報が通知されるので，料金自体がドライバーの経路選択に直接的な誘因を与える．一方，事後変動料金の場合，事前には交通情報のみが提示される．いま，ドライバーが経路選択

を繰り返すことにより，各交通情報の下で実現する事後の走行費用と状況依存的混雑料金の和によって構成される総費用の期待値に関して合理的な期待を形成すると仮定しよう．この時，事後変動料金はドライバーの期待形成を通じて，ドライバーの経路選択行動に間接的な影響を及ぼすことになる．さらに，事後混雑料金は，このような間接効果とは別に交通情報が不完全なために生じた事後の厚生水準の変化を補正する役割も有している．

3.3 交通情報とネットワーク均衡

3.3.1 問題設定

空間的に離れた2つの地点の間にn本の代替的な経路が存在する場合を考える．2地点間の交通需要はMでありその値は固定されている．各ドライバーは，上記のn本の道路のいずれかを通って目的地へ向かう．本研究では，道路ネットワークで生じる不確実性を，都市経済学における方法[7)8)18)]に従ってモデル化する．すなわち，確率的な変動をK個の離散的な状況の生起により表現し，それぞれの状況に対応して各経路の走行時間関数が変化すると考える．このような都市経済学における分析枠組みは，問題の本質をできるだけ簡単な方法で表現するために考案されたものであるが，具体的には以下のような状況を想定していると考えれば判りやすい．各経路には当該経路のみを利用する局所交通が存在し，局所交通量が日々変化すると考える．いま，局所交通量を状況と対応させよう．局所交通量がすでにネットワークに配分されていると考えれば，局所交通量の変動（状況の変化）に対応して経路交通量で記述される走行時間関数は変化することになる．ここでは，局所交通量の変動（状況の生起）が外生的に与えられると考える．以上の問題設定は従来の枠組みを踏襲したものであり，それ自体には新規性はない．

一方，従来の研究では交通管理者は状況の生起に関する完全情報を持つと仮定してきた．しかし，現実には事前に限られた情報に基づいて予測された状況が実際に実現する状況と常に一致する保証はない．交通管理者が有する情報は不完全であり，状況予測において誤りを犯す可能性がある．生起しうる状況をl $(l=1,\cdots,L)$と表そう．交通管理者は生起するであろう状況を事前に予測し，予測した状況に関する情報をメッセージ$e^k \in \omega$ $(k=1,\cdots,K)$としてドライバーに通知する．また，ωはメッセージの集合である．以後，添字kは交通管理者が事前に通知するメッセージの種類を，lは事後に実際に実現する状況を表す．メッセージの数Kと状況の数Lは同一である必要はない．ただし，状況，メッセージは複数個あると仮定し，$L \geq 2, K \geq 2$を仮定する．$L < K$が成立する場合，冗長なメッセージが存在するため，以下では$L \geq K$を仮定する．このことを先

の例を用いて説明しよう．交通管理者は，予測した局所交通量をある種のメッセージとして表現しドライバーに通知することになる．メッセージとして通知される状況は，局所交通量と正確に対応しなくてもいい．予測した局所交通量をカテゴリー化して，事前のメッセージとして表現しよう．一方，事後の状況を実際に生起した局所交通量と対応させよう．この場合には，事前の状況の数は事後の状況の数よりも少なくなる．

いま，交通管理者が局所交通量を正確には予測できない場合を考えよう．事前にあるメッセージe^kを提示したにも関わらず，予測が誤って現実には状況lが生起するという場合も生じうる．そこで，交通管理者が事前にメッセージe^kを通知した時に，事後に状況lが生起する確率をπ^{kl}で定義する．さらに，ドライバーが事前に受け取るメッセージe^kの生起頻度をp^k $(k = 1, \cdots, K)$と，事後に状況lが生起する確率をq^l $(l = 1, \cdots, L)$と表そう．この時，これらの確率の間には

$$\begin{array}{ll} \sum_{k=1}^{K} \pi^{kl} p^k = q^l & \sum_{l=1}^{L} \pi^{kl} = 1, \\ \sum_{k=1}^{K} p^k = 1 & \sum_{l=1}^{L} q^l = 1 \\ (k = 1, \cdots, K; l = 1, \cdots, L) & \end{array} \tag{3.1}$$

が成立する．この時，交通管理者が保有する情報システムΩの特性は$\Omega = (\omega, \boldsymbol{p}, \boldsymbol{\pi} : \boldsymbol{q})$で記述できる．ここに，$\boldsymbol{p} = \{p^k : k = 1, \cdots, K\}, \boldsymbol{\pi} = \{\pi^{kl} : k = 1, \cdots, K; l = 1, \cdots, L\}, \boldsymbol{q} = \{q^l : l = 1, \cdots, L\}$はそれぞれメッセージの生起頻度ベクトル，推移確率行列，状態の生起確率ベクトルである．情報システムΩの特性は交通管理者，ドライバーの両者にとって共有情報であると仮定する．いま，任意の事前メッセージe^kに対して事後に状況lが等確率$\pi^{kl} = 1/L$で生起する場合を考えよう．この時，メッセージe^kは事後の状況に関する何等の情報も伝達せず，情報が通知されなかった場合と本質的には変わらない．一方，メッセージ数と状況の数が一致し，個々のメッセージe^kのそれぞれが，互いに排他的な状況l'と１対１に対応する場合（推移確率が$\pi^{kl'} = 1, \pi^{kl''} = 0$ $(l' \neq l'')$となる場合），交通管理者はドライバーに完全情報を提示していることに他ならない．このように無情報，完全情報の場合も，推移確率π^{kl}を導入することにより，その特殊ケースとして表現することが可能となる．つぎに，これまでの研究[18)7)8)]と同様に，状況lが生じた場合の一般化交通費用（以下、走行費用と呼ぶ）を費用関数$c_i^l(x_i^k)$ $(i = \cdots, n; k = 1, \cdots, K; l = 1, \cdots, L)$を用いて表現する．走行費用は、燃費等の金銭的費用と時間費用で構成される．ここに，x_i^kはメッセージe^kの下での経路iの経路交通量であり．費用関数$c_i^l(x_i^k)$は２階連続微分可能な１価関数であり，

閉区間 $[0, M]$ において以下の条件を満足する．

$$\left.\begin{array}{l} dc_i^l(x_i^k)/dx_i^k > 0 \\ d^2c_i^l(x_i^k)/dx_i^{k^2} \geq 0 \\ 0 < c_i^l(x_i^k) < \infty \end{array}\right\} \tag{3.2}$$

3.3.2　ネットワーク均衡(問題 N)

交通管理者がドライバーにメッセージのみを提示する場合を考える．ドライバーは各瞬間における状況の生起について正確な情報を持たないが，経験を通じて事後に各状況が生起する条件付き確率，及び各状況が生じた時に実現する経路の走行費用を知っていると仮定する．いま，交通管理者がメッセージ e^k を提示した場合を考えよう．メッセージ e^k が提示された時に，実際に状況 l が生起する確率が π^{kl} で表されることに着目しよう．ドライバーは事前にはメッセージ e^k のみを獲得するので，経路 i の交通量は k のみに依存する．したがって，事後的に状況 l が生起した時に，経路 i に交通量 x_i^k が通過した場合の走行費用は $c_i^l(x_i^k)$ で表される．したがって，メッセージ e^k が提供された時，ドライバーが想定する各経路の条件付き期待効用は

$$E^k[U(c_i^l(x_i^k))] = \sum_{l=1}^{L} \pi^{kl} U(c_i^l(x_i^k)) \tag{3.3}$$

と表せる．ここに，期待値オペレーション $E^k[\cdot]$ は事前のメッセージ e^k の下での事後の状況 l の生起に関する推移確率 π^{kl} に関する期待値操作を表す．また，$U(\cdot)$ は c_i^l に依存する基数的効用関数であり，

$$U_i^{l\prime} < 0,\ U_i^{l\prime\prime} \leq 0 \tag{3.4}$$

を満足する．$U_i^{l\prime} = dU/dc_i^l, U_i^{l\prime\prime} = d^2U/dc_i^{l^2}$ であり，$U_i^{l\prime\prime} \leq 0$ はドライバーが危険回避的（等号の時は危険中立的）であることを意味する．ドライバーはメッセージを獲得することができるため，メッセージのそれぞれに対してネットワーク均衡が成立する．ドライバーが同質であると仮定すると，ネットワーク均衡において

$$E^k[U(c_i^l(x_i^k))] = EU^{k^*}, \quad if \quad x_i^k > 0 \tag{3.5a}$$

$$E^k[U(c_i^l(x_i^k))] \leq EU^{k^*}, \quad if \quad x_i^k = 0 \tag{3.5b}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_i^k = M, \quad x_i^k \geq 0 \tag{3.5c}$$

$$(i = 1, \cdots, n; k = 1, \cdots, K)$$

が成立する．ここに，EU^{k^*}は均衡効用水準であり，各メッセージe^kの下で等期待効用配分が成立する．情報提供下で達成される総期待効用を次式で表わす．

$$V_N = M \sum_{k=1}^{K} p^k EU^{k^*} \tag{3.6}$$

3.4 状況依存的混雑料金とネットワーク均衡

3.4.1 状況依存的混雑料金のゼロ収支制約

伝統的な混雑税に関する議論では，混雑に伴う社会的費用を含めた限界費用価格形成原理に基づいて混雑税の水準が設定される．この方法によれば，道路利用の効率化を達成できるが，混雑税を徴収することによりドライバーの総厚生水準は従前の水準より低下する．混雑税の徴収によるドライバーの厚生の低下は，混雑税収入を道路容量拡幅等の財源に充当されることにより相殺されると考える．これに対して，本研究で議論しようとする状況依存的混雑料金は，文等[5]と同様に，ネットワーク利用の効率性改善を目的として決定され，個々の道路における望ましい需給水準を達成することを目指すものではない．モデルの前提条件よりＯＤ交通量は固定されており，経路別の状況依存的混雑料金は経路誘導効果のみを持ちうる．各種の状況依存的な混雑料金システムの経路誘導効果に焦点をあてるために，状況依存的な混雑料金の収入全額が負の定額税としてドライバーに全額還付されるとする．すなわち，ドライバーが負担する状況依存的混雑料金は経路誘導のために課徴される料金とドライバーに還付される負の定額税の合計金額として定義される．そこで，状況依存的混雑料金のゼロ収支制約の下でドライバーの総厚生水準を向上することができるような望ましい状況依存的混雑料金体系を求める問題を考えることとする．なお，状況依存的混雑料金のゼロ収支制約はあくまでも分析結果の見通しを良くするための便宜的な仮定であり，状況依存的混雑料金収入のバランスが（例えば，道路施設の償還額と等しくなるような）正の値をとると仮定しても問題の本質的な構造は変化しない．

3.4.2 事前変動料金の場合（問題A）

混雑料金が状況の生起状態に応じて変化し，それが事前にドライバーに通知されるような事前変動料金を考えよう．このような事前変動料金が経路選択に先だってドライバーに通知されれば，状況依存的混雑料金が交通管理者が予測する交通状態をドライバーに伝達するという交通情報としての役割を果たす[19]．交通管理者が日々の交通状況を予測し，ドライバーに通知するメッセージe^kと対応した最適な混雑料金をドライバーに事前に通知する場合を考える．ドライバーは各経

路で課徴される混雑料金を知った上で経路を選択する．経路iでメッセージe^kが提示される時に徴収される事前変動料金をτ_i^kとしよう．この時，交通管理者が解く問題Aは

$$\max_{x_i^k,\tau_i^k,U^k,s_i^k} \{\sum_{k=1}^{K} p^k U^k\} \tag{3.7a}$$

$$\text{s.t.}\ \ E^k[U(c_i^l(x_i^k)+\tau_i^k)] - U^k + s_i^k = 0 \tag{3.7b}$$

$$s_i^k x_i^k = 0 \tag{3.7c}$$

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{K} p^k \tau_i^k x_i^k = 0 \tag{3.7d}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_i^k = M, \tag{3.7e}$$

$$x_i^k \geq 0,\ s_i^k \geq 0\ (i=1,\cdots,n; k=1,\cdots,K) \tag{3.7f}$$

と表せる．ただし，τ_i^kには非負制約がない．式(3.7b)において，U^kは状況kが事前に通知された時の均衡期待効用を表す．$s_i^k \geq 0$はスラック変数であり，式(3.7c)より$x_i^k > 0$の時，$s_i^k = 0$が成立する．この時，式(3.7b)は状況kの下で$x_i^k > 0$となる経路において等期待効用配分が達成されていることを示している．$s_i^k > 0$の場合には$E^k[U(c_i^l(x_i^k)+\tau_i^k)] < U^k$が成立し$x_i^k = 0$となる．すなわち，式(3.7b),(3.7c)及び(3.7f)は事前料金τ_i^kの下でのネットワーク均衡を表現している．式(3.7d)はゼロ収支条件を，式(3.7e)はOD交通量制約を表している．問題Aは相補制約(3.7c)を含み非凸計画問題となっている．以下，最適解が存在することを仮定して議論を進める．最適解は式(3.7b)-(3.7f)及び1階の最適性の必要条件

$$\bar{\lambda}_i^k E^k[U_i^{kl\prime} c_i^{kl\prime}] + \bar{\eta}_i^k s_i^k - \bar{\mu} p^k \tau_i^k - \bar{\xi}^k = 0\quad (\text{if } x_i^k > 0) \tag{3.8a}$$

$$\bar{\lambda}_i^k E^k[U_i^{kl\prime} c_i^{kl\prime}] + \bar{\eta}_i^k s_i^k - \bar{\mu} p^k \tau_i^k - \bar{\xi}^k \leq 0\quad (\text{if } x_i^k = 0) \tag{3.8b}$$

$$\bar{\lambda}_i^k E^k[U_i^{kl\prime}] - \bar{\mu} p^k x_i^k = 0 \tag{3.8c}$$

$$\bar{\lambda}_i^k - \bar{\eta}_i^k x_i^k = 0 \tag{3.8d}$$

$$p^k - \sum_{i=1}^{n} \bar{\lambda}_i^k = 0 \tag{3.8e}$$

$$(i=1,\cdots,n; k=1,\cdots,K)$$

を満足する．ただし，$\bar{\lambda}_i^k, \bar{\eta}_i^k, \bar{\mu}, \bar{\xi}^k$はそれぞれ式(3.7b), (3.7c), (3.7d), (3.7e)に対応するラグランジュ乗数である．式(3.7c), (3.8a), (3.8c)より次式を得る．式(3.7c)より$x_i^k > 0$の時，$s_i^k = 0$が成立する．したがって，式(3.8a)において$\bar{\eta}_i^k s_i^k = 0$が成立する．ここで，最適経路配分を$x_i^{k\circ}$と

表す．この時，$x_i^{k\circ} > 0$ となる経路において事前変動料金は次式で表される．

$$\tau_i^k = \frac{E^k[U_i^{kl\prime} c_i^{kl\prime}]}{E^k[U_i^{kl\prime}]} x_i^{k\circ} - \frac{\bar{\xi}^k}{\bar{\mu} p^k} \tag{3.9}$$

ただし，$E^k[U_i^{kl\prime} c_i^{kl\prime}] = \sum_{l=1}^{L} \pi^{kl}(\partial U/\partial c_i^l(x_i^{k\circ}))\,(\partial c_i^l\,(x_i^{k\circ})\,/\partial x_i^{k\circ})$，$E^k[U_i^{kl\prime}] = \sum_{l=1}^{L} \pi^{kl}(\partial U\,/\partial c_i^l(x_i^{k\circ}))$ である．なお，$x_i^{k\circ} = 0$ となる経路ではτ_i^kは条件 (3.8b) を満足する範囲の中で任意の値をとれるが，ここでは$\tau_i^k = 0$を仮定する．この時，ドライバーが危険中立的な場合を除いて事前変動料金は問題 A の最適交通量配分に対して一意的に決定される（付録参照）．危険中立的な場合には，同一の目的関数の水準を達成するような最適均衡水準$U^{k\circ}$が複数個存し，事後変動料金は一意的に決定できない（付録参照）．事前変動料金は各メッセージの下での各経路の期待限界社会的費用から各メッセージに対応した定数項を差し引いた値になる．期待限界走行費用 $E^k[U_i^{kl\prime} c_i^{kl\prime}]/E^k[U_i^{kl\prime}]$，利用交通量$x_i^{k\circ}$の大きい経路では 1 単位当たりの交通量増加がもたらす社会的費用の限界的な増加が大きく，混雑料金も相対的に大きな値をとる．このような経路に交通が誘導されると社会的費用がより増加するため，混雑料金により当該経路の利用コストを大きくし当該経路の利用者数を抑制することが必要となる．仮定より$U_i^{kl\prime} < 0$が成立することに留意すれば，式 (3.8c)，(3.8e) より$\bar{\lambda}_i^k \geq 0$，$\bar{\mu} \leq 0$が成立する．一方，$\bar{\xi}^k$の符号は確定しない．$\bar{\xi}^k > 0$の場合には事前変動料金は式 (3.9) の右辺第 1 項より大きくなる．一般には，交通需要が増加すれば期待均衡効用は減少するため$\bar{\xi}^k < 0$が成立する．この場合には，事前変動料金は同式の右辺第 1 項より小さくなる．また，$\bar{\xi}^k$の絶対値が大きくなれば，あるいは$\bar{\mu}$の絶対値が小さくなれば，定数項$\bar{\xi}^k/\bar{\mu}\pi^k$は大きくなり，事前変動料金は小さくなる．このように事前変動料金は社会的費用を内部化する料金と状況に応じて料金を変化させる変動料金を組み合わせており，状況・経路を通じた内部補助によりドライバーの総厚生水準を改善する仕組みになっている．ドライバーの総期待効用は次式で表せる．

$$V_A = M \cdot \sum_{k=1}^{K} p^k U^{k\circ} \tag{3.10}$$

3.4.3 事後変動料金の場合（問題 P）

事前変動料金では，交通管理者が事前に予測した結果に基づいてドライバーに課徴すべき状況依存的混雑料金を通知する．交通管理者が常に完全情報を提供できる場合，事前変動料金によりドライバーの望ましい経路誘導を達成することができる．しかし，交通管理者の予測結果に誤りが含まれる可能性がある場合，事前料金による経路誘導が事後においても常に望ましい状況をもたらすとは限らない．このように交通情報が不完全となる場合，事前には交通状況に関するメッ

セージのみを通知し，現実に生起した状況に基づいて混雑料金を事後に課徴するという方法も考えられる．状況依存的混雑料金のゼロ収支制約の下で，事後的な状況依存的混雑料金によりドライバーの総期待効用を最大にするような分権的ネットワーク均衡を求める問題を定式化する．交通管理者が解くべき問題Pは

$$\max_{x_i^k,\tau_i^{kl},\overline{U}^k,s_i^k} \{\sum_{k=1}^{K} p^k \overline{U}^k\} \tag{3.11a}$$

$$\text{s.t.}\quad E^k[U(c_i^l(x_i^k)+\tau_i^{kl})] - \overline{U}^k + s_i^k = 0 \tag{3.11b}$$

$$s_i^k x_i^k = 0 \tag{3.11c}$$

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{K} p^k E^k[\tau_i^{kl}] x_i^k = 0 \tag{3.11d}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_i^k = M, \tag{3.11e}$$

$$x_i^k \geq 0,\ s_i^k \geq 0 \tag{3.11f}$$

$$(i=1,\cdots,n; k=1,\cdots,K; l=1,\cdots,L)$$

となる．ただし，$\overline{U}^k$は事前に状況kが通知された時の均衡期待効用，$E^k[\tau_i^{kl}] = \sum_{l=1}^{L} \pi^{kl}\tau_i^{kl}$である．問題$P$も非凸計画問題である．最適解は条件 (3.11b)-(3.11f) 及び

$$\bar{\lambda}_i^k E^k[U_i^{kl\prime} c_i^{kl\prime}] + \bar{\eta}_i^k s_i^k - \bar{\mu} p^k E^k[\tau_i^{kl}] - \bar{\xi}^k = 0 \quad (\text{if } x_i^k > 0) \tag{3.12a}$$

$$\bar{\lambda}_i^k E^k[U_i^{kl\prime} c_i^{kl\prime}] + \bar{\eta}_i^k s_i^k - \bar{\mu} p^k E^k[\tau_i^{kl}] - \bar{\xi}^k \leq 0 \quad (\text{if } x_i^k = 0) \tag{3.12b}$$

$$\bar{\lambda}_i^k U_i^{kl\prime} - \bar{\mu} p^k x_i^k = 0 \tag{3.12c}$$

$$\bar{\lambda}_i^k - \bar{\eta}_i^k x_i^k = 0 \tag{3.12d}$$

$$p^k - \sum_{i=1}^{n} \bar{\lambda}_i^k = 0 \tag{3.12e}$$

$$(i=1,\cdots,n; k=1,\cdots,K; l=1,\cdots,L)$$

を満足する．最適経路配分$x_i^{k\circ\circ}$において$x_i^{k\circ\circ} > 0$となる経路では，事後変動料金は

$$E^k[\tau_i^{kl}] = E^k[U_i^{kl\prime} c_i^{kl\prime}] x_i^{k\circ\circ} - \frac{\bar{\xi}^k}{\bar{\mu} p^k} \tag{3.13}$$

$$U_i^{kl\prime} = \bar{\mu} M \tag{3.14}$$

を満足する．各メッセージごとに経路の平均的な混雑料金の水準は式 (3.13) により決定されるが，個別の状況ごとの料金は式 (3.14) を満足するように設定される．式 (3.14) より，危険回避型選好の場合，最適解においてU_i^{kl}は$x_i^{k\circ\circ} > 0$となる任意の経路と任意のk, lに関して一定となる．効用

関数Uが$c_i^l(x_i^k)+\tau_i^{kl}$に関して単調減少関数であり，均衡効用水準はkに依存せず一定値$\overline{U}^{\circ\circ}$をとる．この時，$x_i^{k\circ\circ}>0$，及び$x_{\bar{i}}^{\bar{k}\circ\circ}>0$となる任意の経路，メッセージ，状況の組$(i,k,l)$と$(\bar{i},\bar{k},\bar{l})$に対して

$$\tau_i^{kl} \geq \tau_{\bar{i}}^{\bar{k}\bar{l}} \quad \text{if} \quad c_i^l(x_i^{k\circ\circ}) \leq c_{\bar{i}}^{\bar{l}}(x_{\bar{i}}^{\bar{k}\circ\circ}) \tag{3.15}$$

が成立する．各経路において事後の走行費用が大きくなる場合ほど，混雑料金は相対的に小さくなるという単調関係が成立する．換言すれば，事前に通知されるメッセージの如何に関わらず，経路選択の事後において走行費用がより大きくなれば，より多くの混雑料金の減免措置がとられる．ドライバーには各経路ごとの走行費用の実績値と混雑料金の対応表（料金表）を事前に示しておけばいい．このような料金表は，事前に通知されるメッセージに応じて修正される必要はなく，単一の料金表で十分である．事後料金設計問題は，与件となる情報システムの精度を考慮しながら，走行費用が大きくなる程，状況依存的混雑料金が低くなるという単調関係を持つような単一の料金表を設計する問題に帰着する．事後変動料金が課徴された場合，任意のkに対して$x_i^{k\circ\circ}>0$となるすべての経路で

$$E^k[c_i^l(x_i^{k\circ\circ})] + E^k[c_i^{kl\prime}]x_i^{k\circ\circ} - F^{\circ\circ} - \frac{\bar{\xi}}{\bar{\mu}} = 0 \tag{3.16}$$

が成立する．ただし，$F^{\circ\circ}=U^{-1}(\overline{U}^{\circ\circ})$，$\overline{U}^{\circ\circ}(=\overline{U}^k)$ $(k=1,\cdots,K)$は最適均衡効用水準である．式(3.16)の第1項は経路iを利用するドライバーの期待私的費用，第2項は期待限界外部費用，第3項・第4項は定数であり，式(3.16)はすべてのメッセージと利用経路の間に期待社会的限界費用の均等化が達成されることを示している．総期待効用は次式で表される．

$$V_P = M\overline{U}^{\circ\circ} \tag{3.17}$$

ここで，$x_i^{k\circ\circ}=0$となる経路において$\tau_i^{kl}=0$を仮定すれば，ドライバーが危険中立的な場合を除いて事後料金は一意的に決定される．なお，以上の議論は危険回避的な選好を対象として導かれたものである．危険中立的な場合には，最適解の一意性は保証されず，均衡効用$\overline{U}^k$はメッセージe^kによって異なった値をとりうる．したがって，式(3.16)が成立しない混雑料金も最適解となりうる．このように最適な混雑料金表は一意的に決定できないが，式(3.16)が成立する事後料金は最適解の集合の中に含まれることが保証される（付録参照）．

3.5　情報精度とネットワーク均衡の効率性

3.5.1　ネットワーク均衡の厚生比較

不確実な条件下における経路配分は1）情報の不確実性，2）混雑という外部不経済性，という2種類の要因が存在するため効率的な配分結果が達成できない．交通情報の提供は，情報の不確実性に起因する非効率性を解消するが，混雑という外部不経済性に関しては完全には解消できない．一方，混雑料金は混雑という外部不経済により生じる非効率性を減少させる．さらに，交通情報が不完全な場合には，状況依存的混雑料金を事後的に課徴することにより，予測誤差に伴う非効率性を減少させることができる．そこで，本研究で提案した各種の状況依存的混雑料金を用いて達成されるドライバーの総厚生水準を比較してみよう．その結果は，以下の命題のように整理できる（付録参照）．

[命題1] ある情報システムΩと条件(3.2)を満足する　任意の走行時間関数，条件(3.4)を満足する任意の効用関数に関して，ネットワーク均衡における総厚生水準の間に$V_P \geq V_A \geq V_N$が成立する．ドライバーが危険中立的な場合には$V_P = V_A \geq V_N$が成立する．

事前変動料金を導入することによりドライバーの総厚生水準は交通情報のみが提供された場合よりも必ず改善される．さらに，事前変動料金より事後変動料金の方が必ずドライバーの総厚生水準を改善する．命題1では，走行時間関数及び効用関数の形式に関して，それぞれ式(3.2)，(3.4)を仮定しているだけであり，一般的な内容になっている．また，以上の命題は，任意の推移確率π^{kl}を仮定しており，交通情報の精度の如何に関わらず成立している．前述したように，情報が提供されない場合，完全情報が提供される場合も本モデルの枠組みの中に特殊ケースとして含まれている．したがって，命題1は無情報・完全情報が提供される場合にも成立する．なお，ドライバーが危険中立的な場合には，事前変動料金，事後変動料金はともに無差別となり，どちらの方法を採用しても総厚生水準は一致する．

3.5.2　情報システムの精度の定義

交通情報システム導入の背景には，交通情報の提供によりドライバーの総厚生水準が改善されるという社会的期待が存在する．しかし，小林等[17]はドライバーに完全情報を提供しても，必ずしもドライバーの総厚生水準の改善をもたらすとは限らないことを示した．しかし，状況依存的混雑料金を併用することにより，完全情報の提供の下でドライバーの総厚生水準は必ず改善されることが保証される．以下では，情報システムの性能の向上に伴って変動料金を併用することにより，ド

ライバーの総厚生水準は必ず改善されることを示す．いま，２つの情報システム$\Omega = (\omega, \boldsymbol{p}, \boldsymbol{\pi} : \boldsymbol{q})$と$\hat{\Omega} = (\hat{\omega}, \hat{\boldsymbol{p}}, \hat{\boldsymbol{\pi}} : \boldsymbol{q})$が与えられたとしよう．２つの情報システムは状態の生起確率$\boldsymbol{q}$を共有している．２つの情報システムが提供するメッセージの数をそれぞれ$K, \hat{K}$と表す．Kと同様に$\hat{K} \geq 2$を仮定する．事後に状況lが生起した時に，情報システムΩがメッセージe^k $(k = 1, \cdots, K)$を事前に提供していた尤度ν^{lk} $(l = 1, \cdots, L; k = 1, \cdots, K)$を

$$\nu^{lk} = \frac{p^k \pi^{kl}}{\sum_{j=1}^{K} p^j \pi^{jl}} = \frac{p^k \pi^{kl}}{q^l} \tag{3.18}$$

により定義しよう．また，情報システム$\hat{\Omega}$に対しても尤度$\hat{\nu}^{l\hat{k}}$ $(l = 1, \cdots, L; \hat{k} = 1, \cdots, \hat{K})$を定義する．この時，Blackwellの定理[20]に基づいて，２つの情報システムΩ，$\hat{\Omega}$の間に以下の半順序関係を定義する[15]．

[定義]　情報システムΩ，$\hat{\Omega}$の尤度行列の間に，

$$\hat{\boldsymbol{\nu}} \boldsymbol{Q} = \boldsymbol{\nu} \tag{3.19}$$

が成立する場合，情報システム$\hat{\Omega}$は情報システムΩより「情報的(informative)」である．
ただし，$\hat{\boldsymbol{\nu}} = \{\hat{\nu}^{l\hat{k}} : l = 1, \cdots, L; \hat{k} = 1, \cdots, \hat{K}\}, \boldsymbol{\nu} = \{\nu^{lk} : l = 1, \cdots, L; k = 1, \cdots, K\}$は，それぞれ$(L \times \hat{K})$, $(L \times K)$次元の尤度行列，$\boldsymbol{Q} = \{Q^{\hat{k}k} : \hat{k} = 1, \cdots, \hat{K}; k = 1, \cdots, K\}$は$(\hat{K} \times K)$次元の非負行列であり，$(\hat{k}, k)$要素は情報システム$\hat{\Omega}$がメッセージ$\hat{e}^{\hat{k}}$を提供した時に，情報システム$\Omega$がメッセージ$e^k$を提供する確率を表す．ただし，$\sum_{k=1}^{K} Q^{\hat{k}k} = 1$が成立する．式(3.19)を要素表記すれば次式のようになる．

$$\nu^{lk} = \sum_{\hat{k}=1}^{\hat{K}} \hat{\nu}^{l\hat{k}} Q^{\hat{k}k} \tag{3.20}$$

式(3.19)が成立する場合，情報システムΩの方が同一の状況lに対して，それぞれのメッセージが生起していた尤度がより分散化される．情報システムΩがメッセージe^kを提供した時に，情報システムがメッセージ$\hat{e}^{\hat{k}}$を提供する確率$R^{k\hat{k}}$は

$$R^{k\hat{k}} = \frac{Q^{\hat{k}k} \hat{p}^{\hat{k}}}{\sum_{\hat{k}=1}^{\hat{K}} Q^{\hat{k}k} \hat{p}^{\hat{k}}} = \frac{Q^{\hat{k}k} \hat{p}^{\hat{k}}}{p^k} \tag{3.21}$$

と表される．$R^{k\hat{k}}$の定義より$\sum_{\hat{k}=1}^{\hat{K}} R^{k\hat{k}} = 1$が成立することは明らかである．この時，各情報システムがメッセージを提供する確率$p^k, \hat{p}^{\hat{k}}$の間に

$$\sum_{k=1}^{K} R^{k\hat{k}} p^k = \hat{p}^{\hat{k}} \tag{3.22}$$

が成立する．式(3.19)は任意の情報システムの間の半順序関係であり，これにより任意の情報システムを1次元的に序列化できるわけではない．なお，L次元の無情報システムでは尤度行列$\boldsymbol{\nu}_0$の要素がすべて$\nu^{lk} = 1/L$となる．一方，完全情報システムの尤度行列$\boldsymbol{\nu}$はkの番号をlと対応するように配置すればL次元の単位行列となり，完全情報システムよりinformativeな情報システムは存在しない．

3.5.3 情報精度と総厚生水準の関係

いま，ある情報システムΩと，それよりinformativeな任意の情報システム$\hat{\Omega}$を考える．２つの情報システムの尤度行列の間に式(3.19)が成立する．式(3.20)が成立することに着目すれば，情報システムΩの方が情報システム$\hat{\Omega}$より同一の状況lに対して，それぞれのメッセージが生起していた尤度がより分散される．言い換えれば，情報システム$\hat{\Omega}$の方が，事後の状況lの生起に関してより相関の高いメッセージを提供することになる．この意味で，情報システム$\hat{\Omega}$の方が，より精度の高い情報を提供する．ドライバーが事後の状況の生起に関してより相関の高いメッセージを事前に受け取ることができれば，ドライバーはより合理的な経路選択ができる可能性があるように思われる．以下では，このような予想が成立するかどうかを検討してみよう．

情報システムΩの下で達成される問題N，A，Pの総厚生水準をそれぞれV_N, V_A, V_Pと表す．また，$\hat{\Omega}$の下で実現する総厚生水準を$\hat{V}_N, \hat{V}_A, \hat{V}_P$と表そう．伝統的な情報の経済学では，外生的なリスクの生起に関する情報の価値を議論しており，情報の提供は必ず正の価値を生むことが保証される[15]．しかし，ネットワーク均衡の場合，２．(１) で述べたように情報提供により新しいリスクが内生的に生起するため，情報提供によりドライバーの総厚生水準が必ず改善するとは限らない．しかし，ゼロ収支変動料金を併用することにより，ドライバーの構成水準は必ず向上することが保証される．以上のことを命題としてとりまとめよう（付録参照）．

[命題２] 交通情報システムがよりinformativeになることが常にドライバーの総厚生水準を改善できるとは限らない．しかし，走行時間関数が条件(3.2)，効用関数が条件(3.4)を満足する場合，情報システムがinformativeになれば，ゼロ収支変動料金を併用することによりドライバーの厚生水準は必ず向上する．すなわち，$\hat{V}_A \geq V_A, \hat{V}_P \geq V_P$が成立する．

この命題の前半部分が成立することは，６．で数値事例により示すこととする．残念ながら，情報精度の向上は必ずしもドライバーの総厚生水準の増加をもたらすとは限らない．これは上述の期待とは矛盾するものである．しかし，完全情報が提供された場合でも，ドライバーの合理的な経

路選択の結果実現する等効用配分で達成されるドライバーの総厚生水準が総効用最大化配分で達成される総厚生水準に一致するとは限らない．このことを考えれば，以上の結論はそれほど不思議なことではない．情報精度の向上はドライバーの経路選択における不確実性を軽減するが，依然として個人の自由な経路選択が原因となって生じる外部不経済の問題は解決しない．効率的な経路配分を実現するためには，混雑料金の導入が不可欠である．一方，命題の後半部は，変動料金を併用することにより，情報精度の向上は必ずドライバーの総厚生水準を増加させることが保証されることを主張している．なお，完全情報システム，無情報システムの場合も，ここで対象としている情報システムの特殊な場合に相当することを考慮すれば，以上の命題は無情報システム，完全情報システムの場合にも成立する．まず，無情報システムの場合と不完全情報システムの場合を比較しよう．無情報システムの場合，通知される状況により混雑料金を変化させることはできない．したがって，事前変動料金は状況に依存しない固定的な混雑料金と同一になる．いま，無情報 (null information) において達成される問題 N，A，Pの総厚生水準をそれぞれ$V_{N_N}, V_{A_N}, V_{P_N}$とする．命題2より，直ちに次の系が成立する．

[系1] ゼロ収支変動料金を併用することにより，交通情報が不完全であってもドライバーの厚生水準を必ず増加させることができる．すなわち，$V_A \geq V_{A_N}, V_P \geq V_{P_N}$が成立する．

系1は，たとえ事前に通知される情報が不完全であっても，ゼロ収支変動料金を併用すれば必ずドライバーの総厚生水準は改善されることを主張している．つぎに，交通管理者が完全情報を提供する場合を考える．完全情報の場合，メッセージの数と状況の数は一致しなければならない．交通管理者が提供する情報が完全な場合，交通管理者が提供するメッセージe^k $(k = 1, \cdots, K(= L))$は事後に生起する状況l $(l = 1, \cdots, L)$と1対1に対応する．ドライバーが事前に知る状況が事後においても生起するため，事前混雑料金と事後混雑料金を区別する必要がない．言い換えれば，完全情報下では問題Aと問題Pの最適解は一致する．いま，完全情報 (perfect information) において達成される問題N，A，Pの総厚生水準をそれぞれ$V_{N_P}, V_{A_P}, V_{P_P}$とする．命題2より直ちに以下の系が導かれる．

[系2] 完全情報の提供が常にドライバーの総厚生水準を改善できるとは限らない．しかし，ゼロ収支変動料金を併用すれば完全情報を提供することによりドライバーの厚生水準は必ず向上する．すなわち，$V_{A_P} \geq V_A, V_{P_P} \geq V_P$が成立する．また，完全情報の下では問題$A$と問題$P$の交通量配分は一致し，$V_{A_P} = V_{P_P}$が成立する．

この系の最初の部分は完全情報を提供しても総厚生水準が改善されない場合が生じうることを示

している．完全情報が提供された場合，ネットワーク上で等効用配分が成立する．等効用配分によりドライバーの総効用最大化配分が達成されるとは限らないことを考慮すれば，完全情報を提供しても総厚生水準が必ずしも最大化されるわけではないことは理解できよう．一方，変動料金を併用する場合，完全情報を提供することによりドライバーの総厚生水準を最大化することができる．前述したように，完全情報が提供される場合，事後に通知される状況が必ず実現するため，混雑料金は事前に通知される状況に応じて一意的に決定される．事前料金と事後料金は常に一致し，実際に生起した状況に対応して混雑料金を変化させる必要はない．

3.5.4 政策的含意

ゼロ収支変動料金は混雑状態に応じて料金を変化させることによりドライバーの総厚生水準を改善できるという非常に望ましい性質を持っている．交通管理者が提供する交通情報は完全ではなく誤差を含む可能性がある．このような不完全な情報に基づいて経路誘導を試みる場合には，本研究で提案したような事後料金を導入することにより，ドライバーの総厚生水準をパレート改善することが可能となる．事後料金システムでは，ドライバーが経路選択する時点においては，状況の生起状態に関する情報のみが通知され，混雑料金に関する情報は提示されない．事前の時点では，走行実績値と混雑料金の関係が示されるのみである．経路を走行した時点でドライバーは実際に生起した状況を知ることとなるが，その状況と対応したような混雑料金がドライバーに通知される．換言すれば，走行実績に応じて予め決められた混雑料金が課徴されることになる．その際，式(3.15)に示すように，より走行費用を要する状況が生起した場合ほど，混雑料金はより小さい額となる．ドライバーがある一定の期間に亙って道路利用を繰り返した後に，混雑料金の集計値がドライバーから徴収される．ドライバーは各交通情報の下で道路利用を繰り返すことにより，実際に要する走行費用と事後に徴収される混雑料金の期待値に関して合理的な期待を形成し経路選択を行うことになる．このような事後変動料金の有効性は，２．(３) で述べたようにドライバーが道路利用を繰り返すことより事後の総費用（走行費用と混雑料金の総和）の期待値に関する期待を形成をすることが前提となっている．したがって，事後変動料金は任意のドライバーに対して常に効果を発揮するとは限らない．例えば「あるＯＤを繰り返し利用するドライバー」等，事後変動料金が利用可能なユーザーを限定することが必要となろう．

伝統的な混雑料金では混雑時に料金が増加するため，その社会的受容性に問題があるとされてきた．本研究で提案した事前変動料金においても，事前の期待効用を最大にする経路が，状況の

表－１：数値計算事例

ケース 1	ケース 2
$c_1^1 = 1.0 + 0.6 \times 10^{-3}\ x_1^k$	$c_1^1 = 1.0 + 1.6 \times 10^{-3}\ x_1^k$
$c_2^1 = 1.5 + 1.6 \times 10^{-3}\ x_2^k$	$c_2^1 = 1.5 + 0.6 \times 10^{-3}\ x_2^k$
$c_1^2 = 1.0 + 0.4 \times 10^{-3}\ x_1^k$	$c_1^2 = 1.0 + 0.4 \times 10^{-3}\ x_1^k$
$c_2^2 = 1.5 + 0.1 \times 10^{-3}\ x_2^k$	$c_2^2 = 1.5 + 0.1 \times 10^{-3}\ x_2^k$

生起が判明した事後においても最適な経路となるとは限らないという問題が生じる．特に，交通管理者の予測の誤りが原因で，結果的に高い混雑料金を支払ったり，走行費用が高い経路を選択するような事態がたびたび生じる場合，そのような交通情報システムの社会的受容性は低くなると言わざるを得ない．それに対して，事後変動料金の場合には，交通管理者の予測が誤っていたことが事後に判明し，予測より走行費用が増加した場合には混雑料金の減免措置が講じられることとなる．これは混雑料金の社会的受容可能性という面で優れた性質であろう．なお，以上の議論は固定的交通需要の下で，状況依存的混雑料金による経路誘導効果を分析したものであり，交通需要そのものを管理することを目的とした伝統的なピーク時料金とはねらいが異なることを指摘しておきたい．ピーク時，および非ピーク時の間での交通需要の分散化をめざした状況依存的混雑料金に関する議論は本稿の域を越えており別の機会に発表したいと考える．ここでは，その場合にはピーク時と非ピーク時では異なった混雑料金表が必要となり，ピーク時の混雑料金は相対的に高くなることを指摘するにとどめておく．また，以上で述べた事項は，あくまでも単一ＯＤペアと並行リンク型ネットワークを対象として証明されたものである．一般のネットワークにおいても同様の議論が成立するかどうかに関しては改めて分析する必要がある．したがって，以上の命題は，本研究でとりあげたような問題設定の下で，ゼロ収支混雑料金を徴収することによりドライバーの厚生状態を従前の状態よりも改善することが可能であると述べているに過ぎないことを再度確認しておきたい．

3.6 数値計算事例

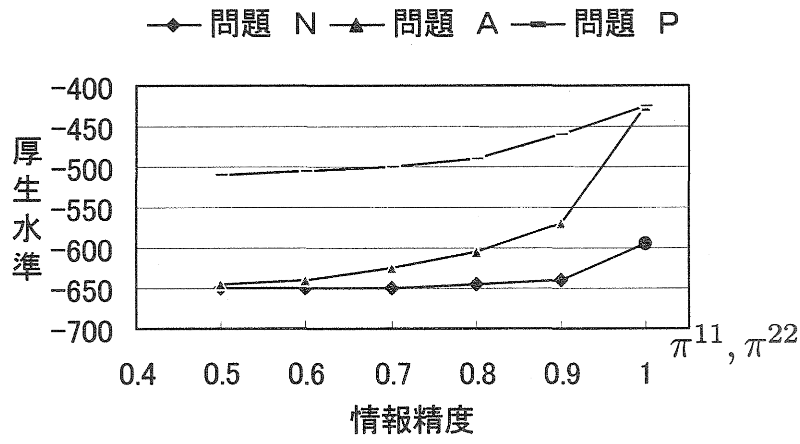
本研究で得られた２つの命題は，本論文で対象とした問題設定の下では条件 (3.2) を満足する任意の走行時間関数，及び条件 (3.4) を満足する任意の効用関数に対して成立しており，強い内容となっている．ここで，数値計算事例を示す主な目的は，命題２に示したパラドクスが生じることを示すとともに，それぞれの命題が意味するところを確認することにある．簡単のために，線形費用

表－2：ネットワーク均衡（ケース1）

問題	経路交通量			混雑料金			厚生水準
	状況	経路 1	経路 2	状況	経路 1	経路 2	
危険中立型							
N	1	2391.5	608.5		-	-	-629.5
	2	1927.3	1072.7		-	-	
A	1	2265.0	735.0	1	-0.90	-1.16	-619.2
	2	1492.0	1508.0	2	1.09	0.84	
P	1	2265.0	735.0	1→1	-0.90	-1.17	-619.2
				1→2	1.01	0.98	
	2	1492.0	1508.0	2→1	-0.99	-1.02	
				2→2	0.47	0.41	
危険回避型							
N	1	2403.1	596.9		-	-	-642.0
	2	2192.8	807.2		-	-	
A	1	2294.0	706.0	1	-0.18	-0.41	-570.2
	2	2133.0	867.0	2	0.25	0.18	
P	1	2264.0	736.0	1→1	-0.29	-0.61	-461.4
				1→2	0.16	0.49	
	2	1492.0	1508.0	2→1	0.15	-1.84	
				2→2	1.10	0.83	

注）混雑料金の状況$k \rightarrow l$の欄はメッセージe^kを提示した時に状況lが生じたことを表している．

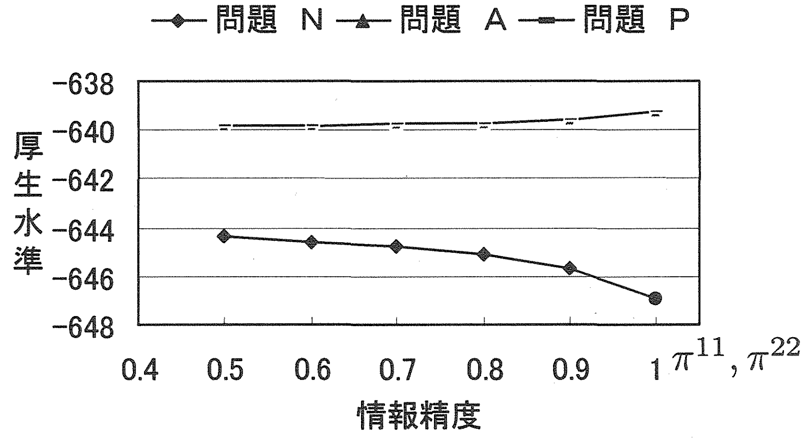
関数$c_i^l(x_i^k) = \zeta_i^l + \upsilon_i^l x_i^k$を考える．状況$k$の数は2，$q^1 = 0.5, q^2 = 0.5, \pi^{11} = 0.9, \pi^{12} = 0.1, \pi^{21} = 0.1, \pi^{22} = 0.9$，交通需要$M = 3000$であるとし，各状況に応じて走行時間関数のパラメータは**表－1**のように変動するとしよう．ケース１は，状況により限界走行費用υ_i^lが大きい経路が異なるようなネットワークを想定している．一方，ケース２はいずれの状況が生起しても経路１の限界走行費用が常に経路２よりも大きくなる場合を想定している．まず，ドライバーの選好が危険中立的，危険回避的な２つの場合を想定し，問題N，A，Pにおけるネットワーク均衡解を求めることにより，命題１が成立することを確認してみよう．まず，ケース１に着目する．危険中立型効用関数$U(y) = -0.1y$を想定した場合のネットワーク均衡を**表－2**に示している．命題１に示すように，問題Pと問題Aにおけるドライバーの厚生水準は一致し，各ネットワーク均衡におけるドライバーの厚生水準の間には$V_P = V_A > V_N$の関係が成立している．一方，**表－2**には，危険回避的効用関数$U(y) = -\exp(-r(s-y))$を用いた計算結果を示している．rは危険回避度を表わすパラメータである．計算では$s = 3, r = 2$とした．本ケースでは$V_P > V_A > V_N$が成立している．また，



図－１：情報精度と厚生水準（ケース１）

危険回避型の場合には，事前変動料金，あるいは事後変動料金を用いるかにより，異なったネットワーク均衡のパターンが得られることになる．つぎに，情報精度がネットワーク均衡に及ぼす影響を分析してみよう．ここでは，２種類の異なった特性を持つネットワークを考える．**図－１**は，ケース１のネットワークをとりあげ，メッセージe^kの下で状況lが生起する事後確率π^{11}, π^{22}が同図の横軸に示すように変化（情報精度が向上）した場合に，ドライバーの厚生水準がどのように変化するかを示している．$\pi^{11} = 0.5, \pi^{22} = 0.5$の場合は無情報の場合，$\pi^{11} = 1.0, \pi^{22} = 1.0$の場合は完全情報の場合に該当する．いずれのネットワーク均衡においても，情報精度の向上によりドライバーの厚生水準は増加していることがわかる．中でも，事前変動料金の場合ドライバーの厚生水準の増加が顕著である．特に，交通情報が完全情報に近づいた場合にドライバーの厚生水準が改善されている．一方，混雑料金が併用されない場合，情報提供によっても厚生水準はそれほど改善されない．このことより，事前変動料金を用いる場合，高精度の交通情報を提供する必要があることが理解できる．一方，事後料金の場合には，情報精度が悪い場合にもドライバーの厚生水準は大きな値を示していることが特徴的である．また，完全情報が提供された場合，事前変動料金と事後変動料金を用いた場合の配分結果は一致し，ドライバーの厚生水準は等しくなる．

一方，ケース２は経路１の限界走行費用が状況によらず常に経路２より大きい場合を想定している．また，危険中立的効用関数を用いている．**図－２**には本ケースにおける情報精度と厚生水準の関係を示している．命題１に示すように，危険中立型効用関数を用いた場合，情報精度によらず問題Aと問題Pの配分結果は一致する．本ケースのように，交通情報の精度の向上により限界



図－２：情報精度と厚生水準（ケース２）

走行費用の大きい道路に交通量が誘導されることになれば，結果としてドライバー全体の厚生水準は悪化する．しかし，本ケースの場合にも，変動料金の併用によりドライバーの厚生水準が増加することが保証される．本ケースの場合，経路１の限界走行費用が常に経路２の場合よりも大きいため，状況の如何に関わらず経路１の利用を抑制することが効果的である．また，情報精度に関わらず経路１の利用を抑制した方が厚生水準を増加させる．したがって，情報精度を向上してもドライバー厚生水準はケース１の場合ほどには増加しない結果となっている．

3.7　おわりに

本研究では不完全情報下における状況依存的混雑料金を用いた経路誘導問題について考察した．状況依存的混雑料金がドライバーの経路選択に先立って事前に課徴されるか，経路選択の事後において走行実績に基づいて課徴されるかによって異なった経路誘導効果を発揮することを指摘し，状況依存的な混雑料金の課徴のタイミングを考慮したような状況依存的混雑料金設計問題を定式化した．その結果，交通情報に不完全性が存在する場合，事後変動料金によりネットワーク均衡の効率性をもっとも改善できることを示した．さらに，交通情報の精度を向上させることによりドライバーの厚生状態を改善できることを明らかにした．もちろん，以上の命題は本研究でとりあげたような単純なネットワークにおいて成立する事項であり，多くの研究課題が今後に残されている．第１に，本研究では１ＯＤ・並行リンク型ネットワークにおける固定需要型静的均衡モデルという極めて単純化かつ限定的な設定での状況依存的混雑料金に関する議論にとどまってい

ることがあげられる．今後はＯＤ交通量の変動も含めた一般ネットワークでの均衡モデルによる解析が必要である．第２に，本研究では同質なドライバーに対する状況依存的混雑料金設計問題をとりあげているが，太田等[9)]のように異質な選好を有するドライバーが混在する場合の状況依存的混雑料金に関する議論も必要となろう．第３に，本研究では外生的に与えられた不確実性のみをとりあげている．不確実性のメカニズムも極めて簡略化されたものとなっている．もちろん，料金制度の効率性比較に関する理論的研究という目的のためには，本研究で採用した仮定は正当化しうる．しかし，今後実用的な混雑料金の設定問題を議論するためには，ドライバーの私的な情報による経路選択の変動，経路交通量や内々交通の変動といったリスクを明示的に考慮する必要がある．このような不完備な情報下での混雑料金の設定問題にアプローチするためには，合理的期待均衡モデル[21)]を用いるのが効果的であろう．第４に，リアルタイムの交通制御を行なうためには，混雑料金もリアルタイムに変化させる必要がある[22)]．この場合，現在のドライバーの経路選択が将来のドライバーの経路選択に影響を及ぼす．この種の動学的外部不経済性[23)]の克服が今後に残された大きな研究課題になっている．最後に，混雑料金のスキームとしては，本研究でとりあげた料金システム以外にも多様な方法が考えられる．今後，代替的な混雑料金スキームに関する研究を蓄積していくことが必要である．

付録Ｉ　混雑料金の一意性と命題の証明

事前変動料金の一意性：　最適経路配分$x_i^{k\circ}$，最適事前料金$\tau_i^{k\circ}$に対して新料金$\tau_i^{k*} = \tau_i^{k\circ} + \iota_i^k$を定義する．均衡条件(3.7b)が成立するためには$x_i^{k\circ} > 0$となる任意の経路において$\iota_i^k = \iota^k \neq 0$が成立しなければならない．ゼロ収支制約より$\sum_{k=1}^K p^k \iota^k = 0$が必要．Jensenの不等式[15)]より$\sum_{k=1} p_k U^{k\circ} = \sum_{k=1} p^k E^k[U(c_i^l(x_i^{k\circ}) + \tau_i^{k\circ})] \geq \sum_{k=1} p^k E^k[U(c_i^l(x_i^{k\circ}) + \tau_i^{k\circ} + \iota^k)]$．新料金は厚生水準を低下させる．等号は危険中立型の場合のみ．**事後変動料金の一意性：** 新料金$\hat{\tau}_i^{kl*} = \tau_i^{kl\circ\circ} + \iota_i^{kl}$を定義する．均衡条件(3.14)より$\iota_i^{kl} = \iota \neq 0$（一定）が成立．ゼロ収支制約を満足するため$\iota = 0$が成立．危険中立（$U_i^{kl\prime}$が一定）の場合，状況間の効用水準を均衡化させる均衡条件(3.14)が機能しない．危険中立型効用関数$U = \alpha(c_i^l(x_i^k) + \tau_i^{kl}) + \beta$を考える．この時，$\sum_{k=1}^K p^k \iota^k = 0$となる新料金$\hat{\tau}_i^{k*} = \tau_i^{k\circ\circ} + \iota^k$を用いた時の均衡効用水準を$\overline{U}^{k**}$とすれば，$\sum_{k=1}^K p^k \overline{U}^{k**} = \sum_{k=1}^K p^k \overline{U}^{k\circ\circ}$が成立．したがって，異なる料金体系の下で同一の効用水準が達成される．

命題１：　ネットワーク均衡解Nは問題Aの実行可能解である．したがって，$V_A \geq V_N$は自明．問題Pにおいて制約条件$\tau_i^{kl} = \tau_i^k$を付加すれば問題Aを得る．故に，$V_P \geq V_A$を得る．危険中立的効用

関数$U=\alpha(c_i^l(x_i^k)+\tau_i^{kl})+\beta$の場合，$\tau_i^k=\sum_{l=1}^{K}\pi^{kl}\tau_i^{kl}$と定義すれば，$\sum_{l=1}^{L}\pi^{kl}\alpha(c_i^l(x_i^k)+\tau_i^{kl})+\beta=\sum_{l=1}^{L}\pi^{kl}\alpha(c_i^l(x_i^k)+\tau_i^k)+\beta$が常に成立．したがって，制約条件$\tau_i^{kl}=\tau_i^k$は自動的に成立し$V_P=V_A$となる．

命題2： $\hat{V}_A \geq V_A$を示す．情報システムΩの下でのネットワーク均衡問題（以下，問題Ωと呼ぶ）の下での任意の実行可能解に対して，それより総厚生水準が大きくなるような実行可能解を問題$\hat{\Omega}$において構成できることを示す．問題Ωにおいて$E^k[U(c_i^l(\bar{x}_i^k)+\bar{\tau}_i^k)]=\overline{U}^k$が成立する実行可能解$\bar{x}_i^k$，$\bar{\tau}_i^k$に着目する．少なくとも1つの$k$に対して$\bar{x}_i^k>0$が成立するような経路の集合を$B$と表す．式(3.18),(3.20)より$p^k\pi^{kl}=\sum_{\hat{k}=1}^{\hat{K}}\hat{p}^{\hat{k}}\hat{\pi}^{\hat{k}l}Q^{\hat{k}k}$を得る．この時，任意の$i\in B$において，Jensenの不等式より$\sum_{k=1}^{K}p^k\overline{U}^k=\sum_{k=1}^{K}p^k\sum_{l=1}^{L}\pi^{kl}U(c_i^l(\bar{x}_i^k)+\bar{\tau}_i^k)=\sum_{k=1}^{K}\sum_{\hat{k}=1}^{\hat{K}}\sum_{l=1}^{L}\hat{p}^{\hat{k}}\hat{\pi}^{\hat{k}l}Q^{\hat{k}k}U(c_i^l(\bar{x}_i^k)+\bar{\tau}_i^k)\leq\sum_{\hat{k}=1}^{\hat{K}}\sum_{l=1}^{L}\hat{p}^{\hat{k}}\hat{\pi}^{\hat{k}l}\ U(\sum_{k=1}^{K}Q^{\hat{k}k}\{c_i^l(\bar{x}_i^k)+\bar{\tau}_i^k\})\leq\sum_{\hat{k}=1}^{\hat{K}}\sum_{l=1}^{L}\hat{p}^{\hat{k}}\hat{\pi}^{\hat{k}l}\ U(c_i^l(\hat{x}_i^{\hat{k}})+\hat{\bar{\tau}}_i^{\hat{k}})=\sum_{\hat{k}=1}^{\hat{K}}\hat{p}^{\hat{k}}\hat{E}^{\hat{k}}[U(c_i^l(\hat{x}_i^{\hat{k}})+\hat{\bar{\tau}}_i^{\hat{k}}]$が成立する．ただし，$\hat{x}_i^{\hat{k}}=\sum_{k=1}^{K}Q^{\hat{k}k}\bar{x}_i^k$，$\hat{\bar{\tau}}_i^{\hat{k}}=\sum_{k=1}^{K}Q^{\hat{k}k}\bar{\tau}_i^k$である．ここで，以下の方程式体系を考えよう．

$$\hat{E}^{\hat{k}}[U(c_i^l(\hat{x}_i^{\hat{k}})+\hat{\bar{\tau}}_i^{\hat{k}}+\hat{\xi}_i^{\hat{k}})]=\hat{\overline{U}}^{\hat{k}} \quad i\in B \tag{3.23a}$$

$$\sum_{\hat{k}=1}^{\hat{K}}\sum_{i\in B}\hat{p}^{\hat{k}}\hat{x}_i^{\hat{k}}(\hat{\bar{\tau}}_i^{\hat{k}}+\hat{\xi}_i^{\hat{k}})=0 \tag{3.23b}$$

$$\sum_{\hat{k}=1}^{\hat{K}}\hat{p}^{\hat{k}}\hat{\overline{U}}^{\hat{k}}=\sum_{\hat{k}=1}^{\hat{K}}\hat{p}^{\hat{k}}\hat{E}^{\hat{k}}[U(c_i^l(\hat{x}_i^{\hat{k}})+\hat{\bar{\tau}}_i^{\hat{k}}] \tag{3.23c}$$

いま，集合Bに含まれる経路の数をIと表す．この方程式体系において$I\hat{K}$個の$\hat{\xi}_i^{\hat{k}}$，$\hat{K}$個の$\hat{\overline{U}}^{\hat{k}}$の合計$I\hat{K}+\hat{K}$個の変数が含まれる．一方，方程式の数は式(3.23a)が$I\hat{K}$個，式(3.23b)が1個，式(3.23c)が1個の合計$I\hat{K}+2$個存在する．$\hat{K}\geq 2$の仮定より，上述の方程式体系において変数の数が式の数を下回ることはない．したがって，上述の方程式体系を満足するような$\hat{\xi}_i^{\hat{k}}$，$\hat{\overline{U}}^{\hat{k}}$が存在する．ただし，$\hat{K}>2$の場合にはこれら変数の値は一意には決まらない．以上の解は問題$\hat{\Omega}$において集合Bに含まれない経路に関して$x_i^k=0$と制約をおいた問題の実行可能解である．この制約を除去したもとの問題$\hat{\Omega}$には少なくとも$\hat{\overline{U}}^{\hat{k}}$と効用水準が等しいか，もしくは大きくなる実行可能解が存在する．すなわち，問題Ωの実行可能解より総厚生水準が大きくなるような問題$\hat{\Omega}$の実行可能解$(\hat{x}_i^{\hat{k}},\hat{\tau}_i^{\hat{k}})$ $(i\in B,\hat{k}=1,\cdots,\hat{K})$を常に構成できる．ただし，$\hat{\tau}_i^{\hat{k}}=\hat{\bar{\tau}}_i^{\hat{k}}+\hat{\xi}_i^{\hat{k}}$である．したがって，$V_A\leq\hat{V}_A$が成立．同様の方法で$V_P\leq\hat{V}_P$を示すことができる．証明は省略する．

参考文献

[1] Walters, A.A.: The theory and measurement of private and social cost of highway congestion, *Econometrica,* Vol. 29, pp. 676-699, 1961.

[2] d'Ouville, E. L. and McDonald, J. F.: Effects of demand uncertainty on optimal capacity and congestion tolls for urban highways, *Journal of Urban Economics*, Vol. 28, pp. 63-70, 1990.

[3] 山内弘隆, 竹内健蔵: 混雑理論の展望ー経済学の視点, 土木学会論文集, 第449号/IV-17,, pp. 17-26, 1992.

[4] Arnott, R., de Palma, A., and Lindsey, R.: Departure time and route choice for the morning commute, *Transportation Research*, Vol. 24B, pp. 209-228, 1990.

[5] 文世一: 混雑料金と交通量配分, 土木計画学研究・論文集, No. 11, pp. 113-120, 1993.

[6] 赤松隆, 桑原雅夫: 確率利用者均衡条件下での最適混雑料金, 土木学会論文集, 第389号/IV-8, pp. 121-129, 1988.

[7] Emmerink, R. and Verhoef, E.: Endogenising demand for information in road transport, *The Annals of Regional Science*, Vol. 30, pp. 201-222, 1996.

[8] 文世一，小林潔司，安野貴人: 価格情報による経路誘導に関する理論的研究，土木学会論文集，第562号/IV-35, pp. 57-67, 1997.

[9] 太田勝久，小林潔司，安野貴人: 混雑料金の経路交通需要に及ぼす情報的効果に関する研究，土木計画学研究・講演集，No. 20(2), pp. 275-278, 1997.

[10] 安野貴人，秀島栄三，小林潔司: 不完備情報下における高速道路料金の情報的役割に関する研究, 都市計画学会論文集，No. 32, pp. 649-654. 1997.

[11] 宮沢健一：情報・決定理論序説，岩波書店，1971.

[12] 石川純治: 情報評価の基礎理論，中央経済社，1988.

[13] Arrow, K.J: *Essays in the Theory of Risk-Bearing*, pp. 121-143, North-Holland, 1970.

[14] Laffont, J.-J.: *The Economics of Uncertainty and Information,* The MIT Press, 1989.

[15] Hirshleifer, J. and Riley, J. G.: *The Analytics of Uncertainty and Information*, Cambridge University Press, 1992.

[16] 酒井泰弘：不確実性の経済学，有斐閣, 1982.

[17] 小林潔司, 文世一, 多々納裕一: 交通情報による経路誘導システムの経済便益評価に関する研究, 土木学会論文集, 第506号/IV-26, pp. 77-86, 1995.

[18] Arnott, R., de Palma A., and Lindsey R.: Does providing information to drivers reduce traffic congestion?, *Transportation Research*, Vol. 25A, pp. 309-318, 1991.

[19] Grossman, S.: *The Informational Role of Prices,* The MIT Press, 1989.

[20] Blackwell, D.: Equivalent compartison of experiments, *Annals of Mathematics and Statistics*, Vol.24, pp. 265-272, 1953.

[21] Kobayashi, K.: Information, rational expectations, and network equilibria - An analytical perspective for route guidance systems, *The Annals of Regional Science*, Vol. 28, pp. 369-393, 1994.

[22] Ben-Akiva, M., de Palma, A., and Kaysi, I.: Dynamic network models and driver information systems, *Transportation Research,* Vol. 25A, pp. 251-266, 1991.

[23] Mun, S.: Traffic jams and the congestion toll, *Transportation Research*, Vol. 28B, pp. 365-375, 1994.

4　不確実性下における家計のサービス予約行動

4.1　はじめに

航空機，新幹線，長距離バス等をはじめとして多くの交通機関では，供給される座席数に制約がある場合が少なくない．劇場，コンサートホール，駐車場等の公共施設においても，サービス供給量に容量制約が存在する．需要量の変動にサービスの供給量を迅速に対応させることが困難な市場ではサービス供給量に容量制約が生じる．また，サービスの価格は固定されており，需給バランスを調整するような価格メカニズムは機能しない．サービスに対して超過需要が発生した場合，潜在的な需要者に対してサービス提供を割り当てる物理的なメカニズムにより需給調整される[1)].

サービスの割り当てメカニズムでは，基本的にはサービスの申し込み順にサービスを割り当てる「早い者勝ち」ルールが適用される．早い者順にサービスを割り当てるという単純なルールを適用することにより効率的な需給調整が可能となる．サービスの予約システムは，サービス消費に先だって，申し込みの早い順に利用日におけるサービス利用の権利を割り当てるシステムである．最近では，高速道路，駐車場等の交通施設利用に対しても予約制度が検討されるなど，効率的な交通需要管理のための施策として予約システムの発展が期待されている．

一般に，サービス供給主体は個々の家計のニーズの違いに関する情報を持ち得ない．予約システムが導入されれば，サービスに対するニーズがより高い家計ほど，より確実にサービスを購入するために，できるだけ早い時期にサービスの予約を試みようとするだろう．すなわち，家計はサービス購入のタイミングを選択することによって，自己のサービスに対するニーズの違いを自分自身で表明することとなる．このような自己選抜 (self-selection) メカニズム[2)]を利用すれば，よりニーズの高い家計に優先的にサービスを割り当てることが可能となる．その結果，より効率性の高いサービスの割り当てが可能となる．

本研究では，需要の不確実性が存在する下での家計のサービスの予約行動をモデル化する．なお，本研究では家計の予約行動にのみ焦点をあて，企業行動はとりあげない．企業行動も同時に考慮したような市場均衡分析に関しては，今後の課題としたい．以下，**4.2 節**では本研究の基本的な考え方を説明する．**4.3 節**では，家計のサービス予約行動をモデル化する．**4.4 節**では，サービスの購入に成功する確率（以下，購入可能確率と呼ぶ）が内生的に決定されるメカニズムを合理的期待均衡モデルにより表現する．**4.5 節**では，数値計算事例を通じて，個人の予約行動に関して考察する．

4.2 本研究の基本的な考え方

4.2.1 従来の研究の概要

交通サービスの最適な予約メカニズム，チケットの事前購入割引制度等に関しては，オペレーションズ・リサーチの分野において研究が蓄積されてきた．なかでも，航空会社の最適なオーバーブッキング問題，事前割引問題に関しては多くの研究者の関心を呼んでおり，急速に研究が進展しつつある分野となっている[3)−6)]．これらの研究は，いずれも企業利潤，あるいは社会的厚生を最大にするような事前予約・購入システムを考察したものである．しかし，家計の需要分布が外生的に与えられており，家計の予約行動と企業行動の相互関係を明示的に考慮したような均衡論的な枠組みを持っていない．一方，経済学の分野では，予約・事前購入制度の導入が市場均衡や社会的厚生に及ぼす影響に関して研究が蓄積している．交通サービスのように需要に不確実性がある場合，価格メカニズムよりもサービスの割り当てメカニズムが有効な場合が少なくない．このような観点から，需要の不確実性下における最適な価格システム[7)8)]，固定価格制度の下におけるサービスの割り当てメカニズム[9)10)]に関して研究が蓄積された．以上は主として独占市場を対象としたものであるが，最近では寡占市場を対象として事前割引制度によるサービス割り当てに関する研究が進展しつつある[11)12)]．しかし，これらの研究ではサービス需要関数あるいは購入確率を与件としており，客の予約行動に関する行動論的な基礎を有していないという限界がある．このような方法論は政策の効果の定性的分析には有効である．しかし，予約システムの経済便益や予約数の定量的予測を行うためには，客の予約行動を明示的にモデル化する必要がある．

一方，情報の不確実性下における個人の動学的意思決定問題に関しては膨大な研究の蓄積がある．事前購入を伴う予約行動の１つの特徴は，一度チケットを事前購入すれば予約をキャンセルするために費用を要するという部分的な不可逆性が存在することである．意思決定問題にこのような不可逆性が存在する場合，意思決定を遅らせる（予約しない）ことによる便益が発生する．このような意思決定の保留行動に関しては，Arrow and Fisher[13)]，Henry[14)]らが先鞭をつけた．その後，将来時点における選択の自由度を保証するような選択肢が有する情報価値に関する研究が進展し，不確実な環境下における意思決定の最適保留行動に関して多側面から分析がなされている[15)−19)]．予約行動のもう１つの特徴は，意思決定を留保することによりサービス購入が不可能となるリスクが存在することである．このようなリスクが存在するため，サービスに対する効用が大きい客ほど，予めサービス消費を予約する可能性が大きくなる．すなわち，不確実性下にお

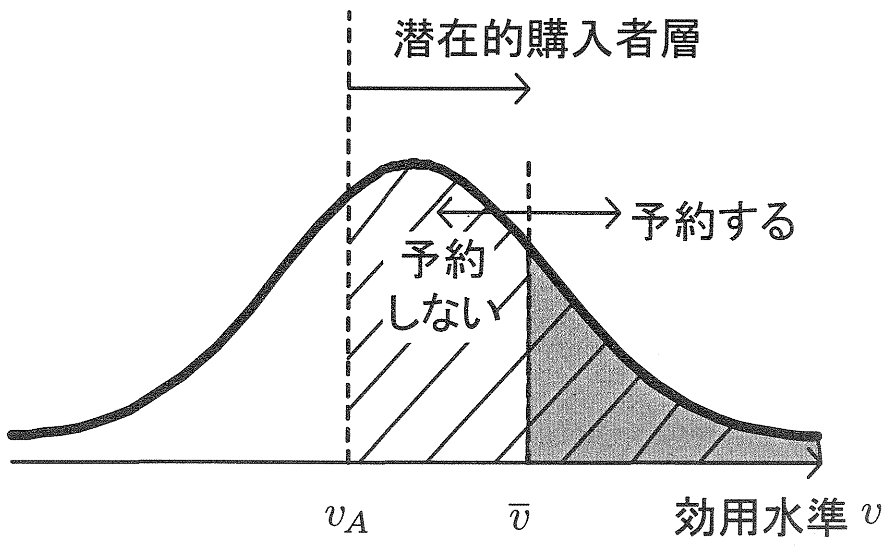
ける予約行動をモデル化するためには，意思決定を留保することにより生じる情報価値の便益とサービス購入の失敗に対するリスク回避の価値を同時に考慮したような意思決定モデルを定式化する必要がある．本研究では，情報価値とリスク回避価値を同時に考慮に入れたような予約行動モデルを定式化することを目的としている．筆者らの知る限り，このような考え方に基づいて予約行動にアプローチした事例は見あたらない．

4.2.2 不確実性のタイプ

時間軸上の２つの時点を考える．１つはサービスを消費する時点（利用時点），いま１つは利用時点におけるサービスの消費を事前に予約する時点（予約時点）である．簡単のために，予約は時間軸上のある１つの時点だけに許されていると考えよう．当然のことながら，予約時点は利用時点より先行する．利用時点にサービスを消費できる家計数は固定されているとする．予約時点で利用時点におけるサービスの消費を事前に予約するかどうかを決定するためには，利用時点で生じるであろう２種類の不確実性を考慮する必要がある．１つは，サービス供給側のリスクである．すなわち，予約をしなかった場合，利用時点でサービスがすでに予約で一杯になって（あるいは売り切れて）おり，サービスを消費できなくなる可能性がある．いま１つは，予約を行おうとする当事者が有する需要側のリスクである．予約時点においては，利用時点周辺における家計の行動計画は完全には決定されていない．予約時点から利用時点まで時間が経過するうちに，考えているサービス消費行動よりもさらに大きな効用をもたらす別の行動計画が出現する可能性がある．この場合には，せっかく行った予約をキャンセルしなければならない．キャンセル料の支払いを求められるケースもあるだろう．このように，家計は供給側・需要側のリスクの双方を同時に考慮しながら，予約時点において利用時点におけるサービスの消費を予約すべきかどうかを決定する．

4.2.3 予約行動と自己選抜メカニズム

家計のサービスに対する選好に異質性があり，サービスに対する効用が図－１に示すように確率分布していると考えよう．一般に，家計のサービスに対する効用水準は私的情報であり，サービス供給者はその値を知ることができない．家計とサービス供給者の間には情報の非対称性が存在する．いま，予約システムが存在せず，サービスが供給される直前にサービスの利用権が販売される場合を考える．効用水準がv_Aの水準以上の家計がサービス購入を希望し，サービス供給量



図－1 自己選抜メカニズム

を超過する需要が発生したとしよう．サービス供給者は家計の効用水準を知ることができず，潜在的な需要者にランダムにサービスが割り当てられる．一方，予約システムが導入された場合を考える．家計のサービスに対する効用水準が低い場合には，将来当該のサービスよりも効用が高い別の行動計画が現れ，予約をキャンセルする可能性がある．したがって，サービスに対する効用が高い家計だけがサービス消費を予約するだろう．**図－1**に示すように，ある臨界的な効用水準$\overline{v}$が存在し，この効用水準より高い効用を持つ者だけが予約すると考えよう．予約システムの導入により，より大きな効用を持つ家計にサービス購入の機会が割り当てられることになる．その結果，相対的に大きな効用を持つ家計は，より確実にサービスを購入できるようになる．家計が予約するということは，「その家計が相対的に大きな効用水準を有している」という私的情報を表明していることに他ならない．このように自分自身の私的情報を行動を通じて表明するようなメカニズムを自己選抜 (self-selection) メカニズム[2)20)]と呼ぶ．予約システムは，家計の予約行動を通じて，サービスに対する効用の大きい家計を優先的にサービスに割り当てる自己選抜メカニズムに他ならない．その結果，サービスのより効率的な割り当てを実現することが可能となる．本研究では，1）予約システムの導入により，**図－1**に示すような家計の自己選抜メカニズムが機能することを示す．さらに，2）臨界的な効用水準$\overline{v}$が決定されるメカニズムを記述する．

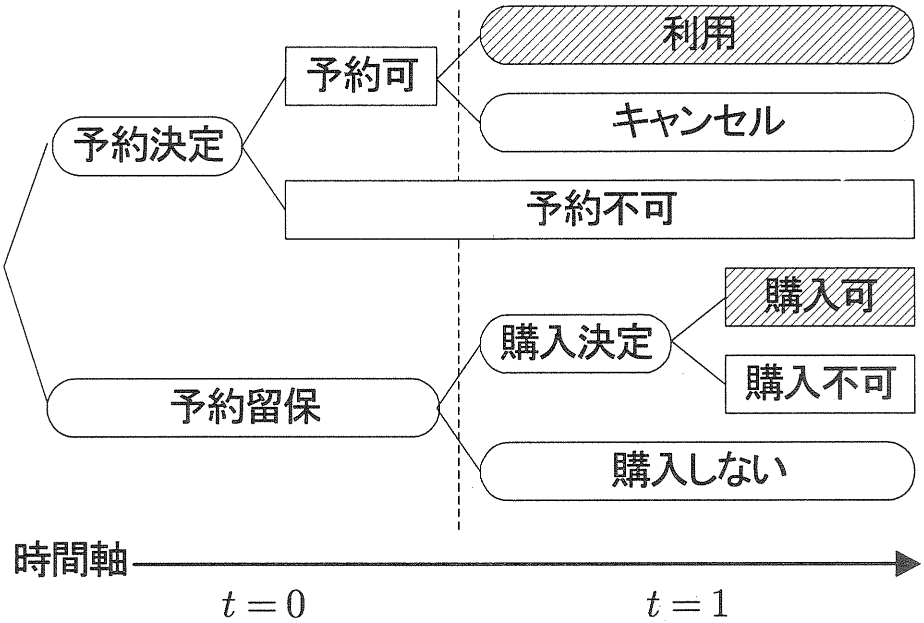
4.2.4 予約行動とリスク配分

予約システムは，事前にサービスの利用権をチケットとして購入することが義務づけられているかどうかにより２つのタイプに分類できる．利用権の購入が義務づけられている場合，サービスの購入をとりやめる場合には予約の解消行動が必ず必要とされる．通常，予約をキャンセルする場合，キャンセル料（あるいは，手数料）が徴収される．この場合，将来時点においてサービスを利用するか否かに付随して生じる需要リスクは家計が一部負担することになる．キャンセルに伴う需要変動のリスクは，キャンセル料によって一部家計が負担するものの，サービス供給者もリスク負担を行うことになる．一方，利用権の事前購入が義務づけられず，予約のキャンセルを無料でできる場合も少なくない．この場合には，将来時点の需要リスクを供給者側が負担することになる．このようにキャンセル料は家計と企業の間でリスク分担をする役割を果たしている．本研究では，このようなサービス供給者と家計の間のリスク分担のルールが家計の予約行動に及ぼす行動を分析しうる予約行動モデルを提案する．なお，望ましいサービスの価格やキャンセル料を分析するためには，サービス企業の行動を含めた市場均衡モデルの開発が必要となる．１．でも言及したように，市場均衡分析に関しては将来の課題としたい．

4.3 家計の予約行動のモデル化

4.3.1 モデル化の前提

同質的なサービスが提供されている独占的市場を考えよう．本研究では家計によるサービス予約行動の分析に焦点を絞るため，サービス供給量やサービス価格は短期的に固定されていると仮定する．このようなサービス市場としては，座席予約が必要な交通サービスを提供している航空路線，長距離バス路線などの交通市場，あるいは各種の公共サービス市場，コンサート等の芸術・文化市場が該当する．個々の家計は当該のサービスに対して異質な選好を有している．家計は１）予約を行う時点 $(t=0)$，２）利用する直前の時点 $(t=1)$ という２つの離散的な時点で，サービスの利用権（チケット）を購入することができる．本研究では，家計は予約時点でサービスの利用権をチケットとして事前購入することが義務づけられていると考える．事前に購入したチケットはキャンセル可能であるが，キャンセル料を必要とする．もちろん，ホテル予約等のように事前にチケットを購入することが義務づけられていない場合も多い．この場合は，事前に購入したチケットを無料でキャンセルすることができると考えればいい．以下，議論をわかりやすくするために「事前に（時点 $t=0$ において）チケットを購入する」という表現を用いるが，これは「サー



図－2　モデルの動的構造

ビスを予約する」ことと同じ意味を持っていることを断っておく．いま，予約時点$(t=0)$でサービスを予約すべきかどうかを検討している家計を考えよう．家計は時点$t=0$において，将来時点$t=1$におけるサービスに対する効用を確定的に把握することができない．利用時点において，サービスに対する効用が機会費用より低下すれば，予約をキャンセルすることとなる．この場合，家計はキャンセル料を負担しなければならない．また，サービスに対する総需要はサービスの供給容量を超過することはできない．予約時点$t=0$においては，利用時点$t=1$においてチケットを確実に購入できるかどうかは判らない．家計はこのようなサービスに対する効用と購入可能確率に関する不確実性を考慮しながら，チケットの購入時期を決定すると考える．

4.3.2　モデルの動的構造

家計の意思決定に関わる論理的な順序関係を図－2に示すようにモデル化しよう．前述したように，時間軸上に離散的な2つの時点$(t=0,1)$を設定する．2つの時点を通じて家計数Nは一定である．予約時点$t=0$では，家計全員に対して予約機会が与えられる．予約希望者は，市場チャンネル機関（予約機関）に予約の希望を同時に申し込む．予約希望者数がサービスの供給数より少ない場合，予約希望者全員にチケット購入の権利が割り当てられる．希望者数が供給数を超過した場合，「くじ」によりランダムにチケット購入の権利が予約希望者に割り当てられる．予

約に成功した家計は，その時点でチケットの価格を支払わなければいけない．予約をした家計の中でチケットをキャンセルする家計は，２回目の購入割り当てが行われる直前に予約をキャンセルすることができる．予約をキャンセルした場合，時点$t=1$でチケットの払い戻しが行われる．サービスが供給される直前に時点に利用可能なチケットが（キャンセルされたチケットを含めて）残っていれば，もう一度潜在的家計にチケットの購入機会が与えられる．直前の時点の割り当てが終了すれば，直ちにサービスが家計に供給されることになる．

4.3.3 需要の不確実性

家計のサービス消費に対する効用を線形効用関数

$$U = v - c - \omega \tag{4.1}$$

を用いて表す．ここに，vは当該のサービスを消費することにより得られる効用値，cはサービスの消費に関わる費用（チケットの価格）である．ωはチケットの購入に要する費用（以下，取引費用と呼ぶ）である．線形効用関数(4.1)は金銭タームで表現されている．一方，家計は当該のサービスを消費する代わりに他の活動を行い効用を獲得することも可能である．他の活動を行うことによって得られる最大の効用水準（以下，留保効用と呼ぶ）をεで表す．家計があるサービスを消費するためには，当該のサービスを消費することにより得られる効用が留保効用より大きくなければならない．いま，事前にサービス消費の予約が可能となる時点$t=0$を考えよう．この時点においては，利用時点における具体的な行動計画は当該のサービスの消費活動以外には存在しないと仮定しよう．すなわち，予約時点で留保効用はゼロ（$\varepsilon=0$）である．しかし，時間が進むにつれて，利用時点周辺における活動計画が具体化されてくる．それによって，利用時点における留保効用εが変化する．いま，時点$t=1$まで進み，留保効用が$\bar{\varepsilon}$に確定したとしよう．この時点において，サービス消費により獲得できる効用が留保効用$\bar{\varepsilon}$よりも大きければ実際にそのサービスを消費し，一方，小さければサービス消費をとりやめようとする誘因が生じるだろう．このように事前予約の時点では，利用時点におけるサービス消費行動の有無を確定的には把握できない．留保効用εが区間$[0,\infty)$で定義される確率変数であり，分布関数$G(\varepsilon)$（密度関数$g(\varepsilon)$）に従って分布すると考えよう．なお，以下では家計の効用vは時点を通じて一定値をとると仮定するが，この仮定は本質的ではない．線形効用関数(4.1)の場合，効用値と留保効用の間の相対的な格差のみが意味を持つ．効用値が変動すると考えてもモデルの本質的な構造は変化しない．そこで，以下では留保効用の変動は効用値の変動も同時に表現していると解釈する．

4.3.4　家計行動の定式化

予約時点において，家計は現時点$t = 0$，および将来の利用時点$t = 1$において，どの程度確実にチケットを購入できるかを想定する．家計が主観的に想定する「チケットの購入に成功する確率（以下，購入可能確率と呼ぶ）」を$\tilde{p}_t$ $(1 \geq \tilde{p}_0 \geq \tilde{p}_1 \geq 0)$と表そう．以下，変数$\tilde{p}_t$は家計の持つ主観的確率を表している．のちに，実際に市場で実現している客観的な購入可能確率をp_tと表すが，主観的確率$\tilde{p}_t$と客観確率p_tを区別するために異なる変数で表現している．購入可能確率は家計の購入行動の結果として市場で内生的に決定されるが，ひとまず与件と考えよう．チケットの価格をcとする．予約をキャンセルする場合，キャンセル料金αcと取引費用ωが必要となる．α $(0 \leq \alpha \leq 1)$はキャンセルに伴うペナルティ率である．

時点$t = 0$において家計は，その時点において判明している効用水準vを与件とした上で,「予約する」か「予約しない」の2通りの選択肢から最適な戦略を取る．時点$t = 0$でチケットを購入した場合には期待効用EVを獲得し，意思決定を留保した場合には期待効用EUを獲得する．時点$t = 0$における期待効用は本節の以下で定式化するが，ここではそれぞれの選択肢を選択したことにより得られる期待効用値がEV, EUで表されることだけを確認しておく．時点$t = 0$における家計行動は

$$\left.\begin{array}{ll} \text{予約する} & EV \geq EU\text{の時} \\ \text{予約しない} & EV < EU\text{の時} \end{array}\right\} \tag{4.2}$$

と表現できる．また，時点$t = 0$で当該の家計が獲得する期待効用Wは，次式で定義される．

$$W = \max\{EV, EU\} \tag{4.3}$$

4.3.5　予約する場合

サービス購入を予約する場合に獲得できる期待効用EVを定式化する．家計が少なくとも予約を行う意思を持つためには，$v \geq c + \omega$を満足する必要がある．以下では，この条件が満足される場合を考えよう．予約時点$t = 0$で予約した場合，利用時点$t = 1$で起こりうる事象としては，1）事前購入したチケットの権利を行使するか，2）予約をキャンセルし，チケットの払い戻しを受けるか，のいずれかである．利用時点においては，チケット購入費はすでに支払っており，そのまま権利を行使する場合には，時点$t = 1$においてvの効用を獲得する．一方，時点$t = 1$でキャンセルする場合にはキャンセル料αcと取引費用ωを差し引いたチケット代金$c - \alpha c - \omega$が還付される．利用時点において，別の行動を行った時に得られる留保効用がεに確定したとしよう．した

がって，予約をキャンセルすることにより得られる効用は$\bar{\varepsilon}+c-\alpha c-\omega$となる．当該の家計は利用時点において，サービスを消費することにより得られる効用vが予約をキャンセルして別の行動を行う効用$\bar{\varepsilon}+c-\alpha c-\omega$よりも大きい限り，当該のサービスを消費するだろう．この時，家計行動は

$$\left.\begin{array}{ll}\text{サービスを消費する} & v \geq \bar{\varepsilon}+c-\alpha c-\omega\text{の時} \\ \text{キャンセルする} & v < \bar{\varepsilon}+c-\alpha c-\omega\text{の時}\end{array}\right\} \tag{4.4}$$

と表現できる．したがって，サービス消費を予約した場合に，利用時点で獲得できる効用水準V_1は

$$V_1 = \max\{v, \bar{\varepsilon}+c-\alpha c-\omega\} \tag{4.5}$$

と定義できる．時点$t=0$においては，時点$t=1$の留保効用$\bar{\varepsilon}$を確定的に把握することはできない．時点$t=0$において，留保効用εは確率密度関数$g(\varepsilon)$に従う確率変数である．時点$t=0$で予約した場合，利用時点$t=1$で得られる効用の期待値$E[V_1]$の時点$t=1$における価値は

$$\begin{aligned} E[V_1] &= E[\max\{v, \varepsilon+c-\alpha c-\omega\}] \\ &= \int_0^\beta v g(\varepsilon) d\varepsilon + \int_\beta^\infty (\varepsilon+c-\alpha c-\omega) g(\varepsilon) d\varepsilon \\ &= \beta G(\beta) + \int_\beta^\infty \varepsilon g(\varepsilon) d\varepsilon + c - \alpha c - \omega \end{aligned} \tag{4.6}$$

と表すことができる．ただし，$\beta = v-c+\alpha c+\omega$，$G(\beta)=\int_0^\beta g(\varepsilon)d\varepsilon$である．$\beta$はサービスに対する効用が$v$の時に，家計が直前に予約をキャンセルすることとなる臨界的な留保効用（最小値）を意味している．$v-c-\omega \geq 0$が成立することより$\beta \geq 0$が必ず成立する．記号$E[\cdot]$は確率変数εに関する期待値操作を表す．家計が予約することにより獲得できる予約時点$t=0$で評価した期待効用$E[V_0]$は

$$E[V_0] = \delta E[V_1] - c \tag{4.7}$$

と表せる．δは利用時点$t=1$における価値を予約時点$t=0$における現在価値に割り引くため割引率を表す．チケットの購入費用は$t=0$の時点で支払われるため，チケットの購入費用は割り引かれない．予約時点において，必ずしも確実にチケットを購入できるかどうか判らない．そこで，予約時点$t=0$で予約すべきかどうかを決定する局面を考えよう．予約時点における購入可能確率を$\tilde{p}_0$とすれば，予約することにより得られる期待効用EVは

$$EV = \tilde{p}_0\{\delta E[V_1] - c\} - \omega \tag{4.8}$$

と表すことができる．ここに，ωは予約を行うための取引費用である．

4.3.6 予約しなかった場合

時点$t=0$で予約しなかった場合を考えよう．利用時点では留保効用がεに確定している．この時点で，1）そのまま購入しないか，2）購入するかの2通りの選択が可能である．チケットを購入しなかった場合には留保効用$\bar{\varepsilon}$を獲得する．一方，チケットを購入した場合には$v-c-\omega$の効用を得る．しかし，チケットが常に購入可能なわけではない．チケットの購入を試みた時点で，他の活動を行う可能性は排除されると考えよう．したがって，チケットの購入を試みたものの購入できなかった場合には留保効用0のみが獲得できると考える．家計の選択結果として，1）チケットを購入できた，2）チケットを購入しようとしたが購入できなかった，3）チケットを購入しなかった，という3通りの結果が可能である．それぞれの場合，家計は以下のような効用を獲得することができる．

$$\left.\begin{array}{ll} v-c-\omega & \text{チケットを購入できた時} \\ -\omega & \text{チケットを購入できなかった時} \\ \bar{\varepsilon} & \text{チケットを購入しなかった時} \end{array}\right\} \tag{4.9}$$

ただし，ωは取引費用である．チケットの購入が可能となる確率を$\tilde{p}_1$とすれば，チケットの購入を試みることにより得られる期待効用は$\tilde{p}_1(v-c)-\omega$となる．したがって，利用時点$t=1$における家計のチケット購入行動は

$$\left.\begin{array}{ll} \text{購入を試みる} & \tilde{p}_1(v-c)-\omega \geq \bar{\varepsilon}\text{の時} \\ \text{購入しない} & \tilde{p}_1(v-c)-\omega < \bar{\varepsilon}\text{の時} \end{array}\right\} \tag{4.10}$$

と表される．予約時点$t=0$の段階では利用時点$t=1$で実現する留保効用$\bar{\varepsilon}$を確定的には把握できない．予約時点ではεは確率密度関数$g(\varepsilon)$に従う確率変数である．時点$t=0$において予約しなかった場合の期待効用U_1は

$$U_1 = \max\{\tilde{p}_1(v-c)-\omega, \bar{\varepsilon}\} \tag{4.11}$$

と表すことができる．家計がチケット購入のインセンティブを持つためには少なくとも$\tilde{p}_1(v-c)-\omega \geq 0$が成立しなければならない．この条件を満足する場合を考えよう．時点$t=0$で予約しなかった場合の期待効用を時点$t=1$で評価した期待値$E[U_1]$は

$$\begin{aligned} E[U_1] &= E[\max\{\tilde{p}_1(v-c)-\omega, \varepsilon\}] \\ &= \int_0^{\gamma} \gamma g(\varepsilon)d\varepsilon + \int_{\gamma}^{\infty} \varepsilon g(\varepsilon)d\varepsilon \\ &= \gamma G(\gamma) + \int_{\gamma}^{\infty} \varepsilon g(\varepsilon)d\varepsilon \end{aligned} \tag{4.12}$$

となる．ここに，$\gamma = \tilde{p}_1(v-c)-\omega$は，サービス消費により獲得できる効用が$v$の時に，利用時点でチケットを購入しなくなるような臨界的な留保効用（最小値）を意味している．$\tilde{p}_1(v-c)-\omega \geq 0$が成立する場合，式(4.12)において$\gamma \geq 0$が成立する．$EV$の場合と同様の考え方により，予約しなかった場合の期待効用EUは

$$EU = \delta \left\{ \gamma G(\gamma) + \int_{\gamma}^{\infty} \varepsilon g(\varepsilon) d\varepsilon \right\} \tag{4.13}$$

と表される．

4.3.7 家計の予約行動の性質

家計が事前に予約するかどうかは式(4.2)により決定できる．家計によって，サービス消費に対する効用水準vは多様に異なる．効用水準vが異なることにより，家計の予約行動がどのように変化するかを分析しよう．家計がサービスを予約する意思を持つためには，少なくともサービスの純便益が正$(v-c-\omega \geq 0)$でなければならない．$v-c-\omega < 0$が成立する場合，家計はサービスを消費する意思をもたず，サービスの予約も試みない．一方，時点$t=1$において家計がチケットを購入しようとする誘因を持つためには$\tilde{p}_1(v-c)-\omega \geq 0$（すなわち，$\gamma \geq 0$）が成立しなければならない．$\gamma \geq 0$が成立する場合，$v-c-\omega \geq 0$も成立する．そこで，$\gamma \geq 0$が成立すると仮定しよう．時点$t=0$で予約した家計が，時点$t=1$で予約をキャンセルする臨界的な留保効用は$\beta = v-c+\alpha c+\omega$と表せる．家計は時点$t=1$における留保効用が$\beta$より大きくなれば予約をキャンセルする．一方，予約しなかった場合，家計がチケットの購入を諦めるための臨界的な留保効用は$\gamma = \tilde{p}_1(v-c)-\omega$で表される．時点$t=1$の留保効用$\varepsilon$が$\gamma$より大きくなればチケットの購入を諦める．いま，

$$\beta - \gamma = (1-\tilde{p}_1)(v-c) + \alpha c + 2\omega \geq 0 \tag{4.14}$$

が成立することより，$\beta \geq \gamma$が成立する．上式より，直ちに以下の性質が成立する．

性質 1　$\gamma \geq 0$が成立すると仮定する．この時，β, γの間に次式が成立する．

$$\beta \geq \gamma \tag{4.15a}$$

$$\frac{\partial(\beta-\gamma)}{\partial v} \geq 0 \tag{4.15b}$$

式(4.15b)において等号は$\tilde{p}_1 = 1$の時に成立する．

式(4.15a)は，事前に予約した場合の方が，サービス消費を取りやめるための臨界的な留保効用が大きくなることを意味している．すなわち，直前にサービス消費をとりやめるにはより多くの抵抗が働くことになる．式(4.14)の右辺第1項は，直前に予約しようとしたが，予約できなかったことにより生じる効用の損失を表しており，事前に予約したことにより防げた効用の損失と解釈できる．第2項はキャンセル料を，第3項は取引費用を表している．すなわち，$\beta-\gamma$は事前に予約した家計が，最終的にサービス消費を諦める（予約をキャンセルする）ために必要となる心理的抵抗の大きさを表している．式(4.15b)はサービスに対する効用vが大きいほど，予約をキャンセルすることに対する心理的効用$(\beta-\gamma)$が大きくなることを意味している．

いま，$\tilde{p}_1<1$であり，キャンセル費用，取引費用に関して$\alpha c=0,\omega=0$が成立する場合を考えよう．この時，事前に予約を行ってもサンクする費用が存在しない．かつ，客は将来価値を割り引かず$\delta=1$が成立するとしよう．この時，$v>c+\omega$が成立する任意のvに対して$EV\geq EU$が成立する（**付録I**参照）．すなわち，すべての顧客が事前予約を試みることになる．この時，$EV-EU$はリスク回避の便益を表している．一方，$\tilde{p}_0=1,\tilde{p}_1=1$が成立する場合を考えよう．すなわち，予約時点，利用時点を通じて，常にチケットが購入可能である．この場合，式(4.8),(4.13)より$\gamma=v-c-\omega\geq0$を満足する任意のvに対して$EU\geq EV$が常に成立する（**付録I**参照）．すなわち，チケットの購入が常に可能である場合，顧客はチケットの予約を行わない．この時，$EU-EV$は予約を留保することの情報価値を表している．ここに，以下の性質が成立する．

性質2　$\tilde{p}_0=1,\tilde{p}_1<1$，$\alpha c=0,\omega=0$，$\delta=1$が成立する場合，予約時点でチケットの購入の意思を持つすべての客がチケットを予約する．$\tilde{p}_0=\tilde{p}_1=1$が成立する場合，すべての客は予約を行わない．

性質2は極端な意思決定環境の下で成立する事項である．現実の意思決定環境の下では，情報の価値とリスク回避の価値の双方が同時に現れる．家計が予約を行うか否かは意思決定環境の性質と家計の効用水準，留保効用水準に依存することになる．いま，予約時点における期待効用EV,EUはサービス消費により獲得できる効用水準vの関数になっていることに着目しよう．ここで，以下の性質が成立する（**付録II**参照）．

性質3　$\gamma\geq0$が成立すると仮定する．この時，期待効用EV,EUは以下の性質を満足する．

$$\frac{\partial EV}{\partial v}=\delta\tilde{p}_0G(\beta)\geq0 \tag{4.16a}$$

$$\frac{\partial EU}{\partial v}=\delta\tilde{p}_1G(\gamma)\geq0 \tag{4.16b}$$

$$\frac{\partial(EV - EU)}{\partial v} = \delta(\tilde{p}_0 G(\beta) - \tilde{p}_1 G(\gamma)) \geq 0 \tag{4.16c}$$

$$\lim_{v \to \infty}(EV - EU) = \begin{cases} +\infty & \tilde{p}_0 > \tilde{p}_1 \text{の時} \\ \xi < 0 & \tilde{p}_0 = \tilde{p}_1 \text{の時} \end{cases} \tag{4.16d}$$

$$\lim_{v \to 0}(EV - EU) < 0 \tag{4.16e}$$

ただし，$\xi = -(\tilde{p}_0 - \delta\tilde{p}_1)c - (1-\delta)\omega < 0$である．

性質(4.16a),(4.16b)はともにサービスに対する効用水準vが増加すれば，期待効用EV, EUも増加することを表している．さらに，性質(4.16c)よりサービスに対する効用が大きくなるほど，期待効用EVとEUの格差は単調に増加することを意味している．一方，性質(4.16d)は時点$t=0$の購入可能確率が時点$t=1$の購入可能確率より大きいならばサービスに対する効用が十分に大きくなると必ず事前予約を行い，両期の購入可能確率が等しいときにはサービスに対する効用が大きくなっても予約を見送ることを意味する．性質(4.16e)より，サービスに対する効用が0の場合，予約時点において家計は必ず予約を見送ることが判る．期待効用の格差が単調に増加する性質(4.16c)と性質(4.16d),(4.16e)より，$\tilde{p}_0 > \tilde{p}_1$の時には期待効用$EV$と$EU$が等しくなるような臨界的な効用水準（以下，臨界予約効用と呼ぶ）$\overline{v}$がただ1つ存在することが保証される．ここに以下の命題が成立する．

命題　$\tilde{p}_0 > \tilde{p}_1$ならば$EV = EU$が成立するような臨界予約効用$\overline{v}$がただ1つ存在し，$v \geq \overline{v}$の場合には予約を行い，$v < \overline{v}$の場合には予約を見送る．

命題はサービスに対する効用水準が臨界予約効用より大きい家計だけが，予約時点でサービスの予約を行うことを主張している．家計は予約行動を通じて自己の効用水準という私的情報を表明することになる．すなわち，予約システムは２.（２）で述べた自己選抜メカニズムが機能を有しており，サービス供給者は予約システムを通じて，サービスに対してより効用の大きい家計にサービスを優先的に割り当てることが可能となる．

4.3.8　予約確率モデル

以上では，家計のサービスに対する効用vが確定的に与えられていることを前提として議論を進めた．しかし，家計のサービスに対する効用は利用時点によって多様に変動するだろう．いま，ある家計の現在から将来に及ぶ行動計画を表すタイムテーブルに着目しよう．現時点における行動計画はかなり明確に決まっているが，将来時点の行動計画は未定の部分がかなりある．この家計は着目しているサービスの消費をすべての時点で行うわけではない．この家計のタイムテーブ

ルの中から，ある利用時点が偶然に選ばれ，その利用時点よりもある一定の期間先だった予約時点に利用時点におけるサービス消費を予約するかどうかを意思決定することになる．

いま，ある家計の利用時点における当該のサービスに対する効用vがある分布関数$F(v)$に従って分布していると考える．予約時点までに，利用時点における当該のサービスに対する効用vが区間$(-\infty, \infty)$で定義された分布関数$F(v)$（確率密度関数$f(v)$）に従う確率分布の中からランダムに選ばれると考えよう．この時，ある家計が予約時点$t=0$において，利用時点$t=1$におけるサービス消費を予約する確率（以下，予約確率と呼ぶ）πは

$$\pi = \mathrm{Prob}\{EV(v) \geq EU(v)\} \tag{4.17}$$

で定義できる．$EV(v), EU(v)$はそれぞれ式(4.8),(4.13)で定義される期待効用であり，効用水準vの関数として表される．EU, EVはともに確率変数vを含む非線形式で表され，式(4.17)に基づいて予約確率を求めることは容易でない．しかし，**命題**を用いれば，式(4.17)を簡便な予約確率モデルに変換することができる．いま，$\tilde{p}_0 > \tilde{p}_1$を仮定する．**命題**より，家計は$v \geq \overline{v}$が成立する場合，サービスの消費を事前に予約する．着目している家計の予約確率πは

$$\pi = \mathrm{Prob}\{v \geq \overline{v}\} = 1 - F(\overline{v}) \tag{4.18}$$

で定義される．$\overline{v}$は臨界予約効用である．ここで，確率効用を加法効用モデル

$$v = v^* + \zeta \tag{4.19}$$

で表そう．ここに，v^*は確定効用項，ζは確率効用項である．たとえば，ζは平均0の分散σ^2の正規分布$N(0, \sigma^2)$に従う確率効用項と仮定すれば，予約確率モデルは2項プロビットモデル

$$\pi(v^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{\overline{v}-v^*}^{\infty} \exp\left\{\frac{-\zeta^2}{2\sigma^2}\right\} d\zeta \tag{4.20}$$

で表現できる．予約確率モデルも通常の2項離散選択モデルを用いて定式化できる．しかし，ここで留意すべきことは臨界予約効用$\overline{v}$は家計効用の特性を表現するパラメータ（定数項）ではなく，家計行動により決定される内生変数である点である．すなわち，$\overline{v}$は$EV(\overline{v}) = EU(\overline{v})$が成立するような$\overline{v}$として求まる．期待効用を明示的に計算するためには，家計の主観的期待$\tilde{p}_0, \tilde{p}_1$を求める必要がある．主観的期待は，家計が置かれている意思決定環境や料金，キャンセル料金によって影響を受ける．したがって，予約確率モデルを政策分析に用いるためには，家計の主観的期待が形成されるメカニズムをモデル化しなければならない．本研究の以下では，家計の主観的期待を市場における合理的期待均衡としてモデル化する方法を提案することとする．

4.4 合理的期待均衡モデルの定式化

4.4.1 合理的期待仮説

以上の議論では，家計が考えるチケットの購入可能確率に関する主観的期待$\tilde{p}_0, \tilde{p}_1$を与件と考えていた．家計の購入可能確率に関する主観的期待は家計自らが形成したものである．家計は予約環境が変化すれば家計は経験を通じて自らの主観的期待を修正していくだろう．予約確率モデルを完結させるためには家計の主観的期待の形成行動をモデル化する必要がある．このような主観的期待の形成メカニズムに関する１つの自然な仮定は，家計は市場で長期的に実現する購入可能確率を学習するという合理的期待形成仮説である[21)]．ここで，個々の家計の主観的確率と市場で実現する客観的な購入可能確率の間には相互関係があることに着目しよう．たとえば，家計が購入行動を変更した場合を考えよう．家計の購入行動の変化により購入可能確率が変化する．家計がチケットの購入行動を繰り返すことにより，長期的には購入可能確率を学習する．あるいは，公共主体が購入可能確率を公共情報として家計に提供することも考えられる．このような長期的な学習行動の結果として，家計が予想する購入可能確率に関する主観的な期待と客観的な購入可能確率が一致するような状況を考えよう．このような状況が達成されれば，家計は主観的期待を変更しようとする誘因をもたないだろう．本研究では，家計の主観的期待が客観的購入可能確率に収束するような均衡を合理的期待均衡と呼ぶこととする．

4.4.2 購入可能確率の定式化

いま，各家計の主観的確率$\tilde{p}_0, \tilde{p}_1$を与件と考え，市場で実現する購入可能確率の確率分布を導出してみよう．いま，N人の個人で構成される社会を考えよう．簡単のためにすべての家計が同一の主観的期待を有していると仮定しよう．ここでの議論においては，主観的期待が市場で実現する客観的確率と同じである必要はない．家計が異なる主観的確率を持つ場合には，家計の学習モデル[21)]を明示的に考慮し，家計の主観的期待が合理的期待に収束する均衡化メカニズムを表現する必要がある．しかし，本稿においては合理的期待均衡を定式化することを目的としており，学習モデルを用いたアプローチはとりあげない．

当該のサービスに対する家計i $(i = 1, \cdots, N)$の効用v_iは共通の分布関数$F(v_i)$に従って分布するが，予約時点$t = 0$までに当該サービスに対する効用水準$\overline{v}_i$は確定していると考えよう．各家計は同一の分布関数$F(v_i)$を持っていると仮定する．予約時点において「予約する」あるいは「予約しない」という意思決定の境目となる臨界予約効用を$\overline{v}$と表す．時点$t = 0$で予約を試みる予約

希望者数をn_0，利用時点$t=1$における購入希望者数をn_1，時点$t=0$で予約したが，利用時点までに予約をキャンセルする家計数をmと表そう．また，予約時点で予約を試みたが予約に成功しなかった家計は，時点$t=1$においてサービスの購入を試みないと仮定しよう．サービスに供給制約があるため，予約希望者がすべて予約に成功するわけではない．そこで，予約時点で実際にサービスの予約に成功した家計数をn_0^*，利用時点においてチケットを購入した家計数をn_1^*とする．潜在的な家計総数をN，サービスの供給量をQとおく．定義より，これらの家計数の間には

$$N \geq n_0 + n_1 \geq 0, \tag{4.21a}$$

$$Q \geq n_0^* + n_1^* - m \geq 0 \tag{4.21b}$$

$$Q \geq n_0^* \geq 0 \tag{4.21c}$$

$$n_0 \geq n_0^* \geq m \geq 0,\ n_1 \geq n_1^* \geq 0 \tag{4.21d}$$

が成立する．時点$t=0$において$Q \geq n_0$ならばすべての予約希望者が予約に成功するが，$Q < n_0$の場合には予約できない家計が現れる．

いま，当該のサービス利用が繰り返し行われ，個々の利用日における当該サービスに対する効用値が日々変動する．したがって，サービスに対する潜在的需要プロフィルn_0, n_1, mも日々変動することになる．そこで，各個人の効用値の分布関数$F(v_i)$を用いてサービス需要の確率分布を求め，市場で客観的に実現する購入可能確率p_0，p_1を導出しよう．いま，家計iの時点$t=0$における予約確率π_iが式(4.18)で表され，すべての家計が共通の予約確率を持つと仮定しよう．すなわち，$\pi_i = \pi \quad (i=1,\cdots,N)$が成立する．この時，$n_0$人の家計がサービスの予約を試みる条件付き確率$P(n_0)$は2項分布

$$P(n_0) = \frac{N!}{n_0!(N-n_0)!}\pi^{n_0}(1-\pi)^{(N-n_0)} \tag{4.22}$$

で表せる．$N \to \infty$のときには条件付き予約確率は以下に示すポアソン分布で近似できる．

$$P(n_0) = \frac{(N\pi)^{n_0}}{n_0!}\exp(-N\pi) \tag{4.23}$$

この時，予約時点$t=0$で満席になる確率$\bar{P}$は

$$\bar{P} = \sum_{n_0=Q}^{N} P(n_0) \tag{4.24}$$

となる．したがって，時点$t=0$において，サービス予約者数がn_0^*となる確率$P(n_0^*)$は

$$P(n_0^*) = \begin{cases} P(n_0) & n_0^* < Q\text{の時} \\ \bar{P} & n_0^* = Q\text{の時} \end{cases} \tag{4.25}$$

と表せる．一方，n_0を与件とした時の購入可能確率は

$$p_0(n_0) = \begin{cases} 1 & n_0 \leq Q \text{の時} \\ \frac{Q}{n_0} & n_0 > Q \text{の時} \end{cases} \tag{4.26}$$

と表される．これより，時点$t=0$においてチケットを購入できる（無条件）購入可能確率$p_0 = E[p_0(n_0)]$は

$$p_0 = \sum_{n_0=0}^{Q} P(n_0) + \sum_{n_0=Q+1}^{N} \frac{Q}{n_0} P(n_0) \tag{4.27}$$

と定義できる．ここで，確率p_0は客観的購入可能確率であり，先に用いた主観的確率$\tilde{p}_0$とは区別している．また，時点$t=0$においてチケットを購入できる人数の期待値$E[n_0^*]$は以下のようになる．

$$E[n_0^*] = \sum_{n_0=0}^{Q} n_0 P(n_0) + \sum_{n_0=Q+1}^{N} Q P(n_0) \tag{4.28}$$

つぎに，キャンセル行動を考えよう．予約時点でチケットを購入したが，利用時点において予約をキャンセルするのは，予約時点においてサービスに対する効用が臨界水準$\overline{v}$以上であり，かつ利用時点における留保効用εが臨界効用$\beta = v - c + \alpha c + \omega$よりも大きくなる場合である．臨界効用$\beta$は効用水準$v$と対応して変化する．このことを明示的に表現するために，臨界効用を$\beta(v)$と表そう．留保効用が臨界効用より大きくなる確率は$1 - G(\beta(v))$である．いま，予約時点の効用がv $(v \geq \overline{v})$である家計が利用時点においてキャンセルする確率は，留保効用εが臨界効用$\beta(v)$より大きくなる確率で定義できる．いま，効用水準が確率密度関数$f(v)$に従って分布していると考えよう．このとき，時点$t=0$で予約した家計のうち，その家計が時点$t=1$でキャンセルすることになる条件付き確率ϕは

$$\phi = \frac{\int_{\overline{v}}^{\infty} f(v)\{1 - G(\beta(v))\} dv}{\int_{\overline{v}}^{\infty} f(v) dv} \tag{4.29}$$

と表せる．時点$t=0$における予約者数がn_0^*である時に，その中からm人の家計が時点$t=1$においてキャンセルする条件付き確率$M(m|n_0^*)$は2項分布

$$M(m|n_0^*) = \frac{n_0^*!}{m!(n_0^* - m)!} \phi^m (1-\phi)^{(n_0^* - m)} \tag{4.30}$$

で表される．同様に，時点$t=0$における予約成功者数がn_0^*である時，時点$t=1$においてキャンセルする家計数の期待値$E[m|n_0^*]$は以下のようになる．

$$E[m|n_0^*] = \sum_{m=0}^{n_0^*} m M(m|n_0^*) = n_0^* \phi \tag{4.31}$$

最後に，時点$t=0$で予約しなかったものの利用時点$t=1$においてチケットを購入する行動を考える．時点$t=1$において，チケットの購入を試みる家計は，1）予約時点のトリップ効用vが$\overline{v}$より小さく，2）利用時点の臨界効用$\gamma(v)=\tilde{p}_1(v-c)-\omega$が正であり，3）利用時点の留保効用$\varepsilon$が臨界効用$\gamma(v)$以下になる家計のみである．留保効用が臨界効用以下になる確率が$G(\gamma(v))$と表されることに着目しよう．さらに，$\gamma(v)<0$の家計はサービスを消費しない．$v\geq\overline{v}$である家計は時点$t=0$で予約を試みている．予約時点で予約に成功しなかった家計の再購入行動を考えない場合，予約時点において予約を試みなかった家計（$v<\overline{v}$が成立する家計）が，利用時点において購入を試みようとする条件付き確率ψは

$$\psi=\frac{\int_{\gamma^{-1}(0)}^{\overline{v}} f(v)G(\gamma(v))dv}{\int_{-\infty}^{\overline{v}} f(v)dv} \tag{4.32}$$

と表せる．ただし，$\gamma^{-1}(0)$は$\gamma(v)=0$が成立するようなvを意味する．この時，時点$t=0$でn_0人が予約を試みたという状況の下でn_1人の家計が時点$t=1$において購入する意思を持つ条件付き確率$R(n_1|n_0)$は2項分布

$$R(n_1|n_0)=\frac{(N-n_0)!}{n_1!(N-n_0-n_1)!}\psi^{n_1}(1-\psi)^{(N-n_0-n_1)} \tag{4.33}$$

で表される．時点$t=0$で予約成功者数がn_0^*，キャンセル数がmの場合，売れ残っているチケット数$\hat{n}$は$\hat{n}=Q-n_0^*+m$と表される．キャンセルした家計が時点$t=1$でチケットを購入する可能性はない．したがって，時点$t=1$においてn_1人の購入希望者があり，チケットが$\hat{n}$枚売れ残っている場合の条件付き購入可能確率$p_1(n_1:\hat{n})$は

$$p_1(n_1:\hat{n})=\begin{cases}1 & n_1\leq\hat{n}\text{の時}\\ \frac{\hat{n}}{n_1} & n_1>\hat{n}\text{の時}\end{cases} \tag{4.34}$$

と定義できる．時点$t=0$でn_0人が予約を試み，その結果予約に成功したn_0^*人の内でm人キャンセルした場合に，時点$t=1$でチケットを購入できる条件付き確率$E[p_1|n_0,m]$は

$$E[p_1|n_0,m]=\sum_{n_1=0}^{\hat{n}(n_0,m)}R(n_1|n_0)+\sum_{n_1=\hat{n}(n_0,m)+1}^{N-n_0}\frac{\hat{n}(n_0,m)}{n_1}R(n_1|n_0) \tag{4.35}$$

で表せる．ただし，$\hat{n}(n_0,m)$は

$$\hat{n}(n_0,m)=\begin{cases}Q-n_0+m & (n_0\leq Q\text{の時})\\ m & (n_0>Q\text{の時})\end{cases} \tag{4.36}$$

と表せる．また，時点$t=1$でチケットを購入する家計数の条件付き期待値$E[n_1^*|n_0,m]$は

$$E[n_1^*|n_0,m]=\sum_{n_1=0}^{\hat{n}(n,m)} n_1 R(n_1|n_0)+\sum_{n_1=\hat{n}(n_0,m)+1}^{N-n_0} \hat{n}(n_0,m)R(n_1|n_0) \tag{4.37}$$

となる．ここで，n_0, mが式(4.22),(4.30)に従って分布することに着目しよう．この時，時点$t=1$でチケットが購入できる（無条件）購入可能確率は

$$p_1=\sum_{n_0=0}^{Q}\sum_{m=0}^{n_0} M(m|n_0)P(n_0)E[p_1|n_0,m]+\sum_{n_0=Q+1}^{N}\sum_{m=0}^{Q} M(m|Q)P(n_0)E[p_1|n_0,m] \tag{4.38}$$

と表せる．ただし，$M(m|Q)$は

$$M(m|Q)=\frac{Q!}{m!(Q-m)!}\phi^m(1-\phi)^{(Q-m)} \tag{4.39}$$

である．また，時点$t=1$でチケットを購入する人数の（無条件）期待値は

$$E[n_1^*]=\sum_{n_0=0}^{Q}\sum_{m=0}^{n_0} M(m|n_0)P(n_0)E[n_1^*|n_0,m]+\sum_{n_0=Q+1}^{N}\sum_{m=0}^{Q} M(m|Q)P(n_0)E[n_1^*|n_0,m] \tag{4.40}$$

で定義できる．

4.4.3 合理的期待均衡

本研究では，家計の主観的期待が客観的購入可能確率に収束するような均衡を合理的期待均衡と定義する．いま，式(4.27), (4.38)で求めた客観的購入可能確率p_0，p_1は，家計の主観的期待$\tilde{p}_0,\tilde{p}_1$を与件として導出したものである．このことを明示的に表現するために，主観的期待$\tilde{p}_0,\tilde{p}_1$を与件として導出した客観的購入可能確率を，それぞれ$p_0(\tilde{p}_0,\tilde{p}_1)$，$p_1(\tilde{p}_0,\tilde{p}_1)$と表すこととする．このようにして求めた客観的購入可能確率が当初の主観的期待$\tilde{p}_0,\tilde{p}_1$と一致する保証はない．この場合，家計は自らの主観的期待を修正するだろう．長期学習の結果，すべての家計が主観的期待値を修正するインセンティブを持たない合理的期待均衡に収束したと仮定しよう．このような合理的期待均衡では，市場で実現する客観的購入可能確率が家計の主観的期待に一致する．すなわち，合理的期待は

$$p_0^*(\tilde{p}_0^*,\tilde{p}_1^*)=\tilde{p}_0^* \tag{4.41a}$$

$$p_1^*(\tilde{p}_0^*,\tilde{p}_1^*)=\tilde{p}_1^* \tag{4.41b}$$

を同時に満足する$(\tilde{p}_0^*,\tilde{p}_1^*)$として定義される．なお，以上では家計自らが経験を繰り返して学習することを想定していた．しかし，この仮定は本質的ではない．公共主体が学習を繰り返し，シス

テム的なバイアスのないような購入可能確率を家計に提供する場合にも，同様な合理的期待均衡が得られる．

4.5 数値計算事例

4.5.1 問題設定

数値計算により予約モデルの性質を確認してみよう．数値計算を行うためにはサービスに対する効用，留保効用の確率分布を特定化する必要がある．以下では，まず客の予約確率をプロビットモデル (4.20) で表そう．客のサービスに対する確率効用が正規分布 $N(0,\sigma^2)$ に従って分布すると考える．さらに，留保効用が平均μの指数分布に従うと仮定しよう．すなわち，εが確率密度関数

$$g(\varepsilon)=\frac{1}{\mu}\exp\left(-\frac{\varepsilon}{\mu}\right) \tag{4.42}$$

に従って分布する．この時，期待効用EV, EUは具体的に

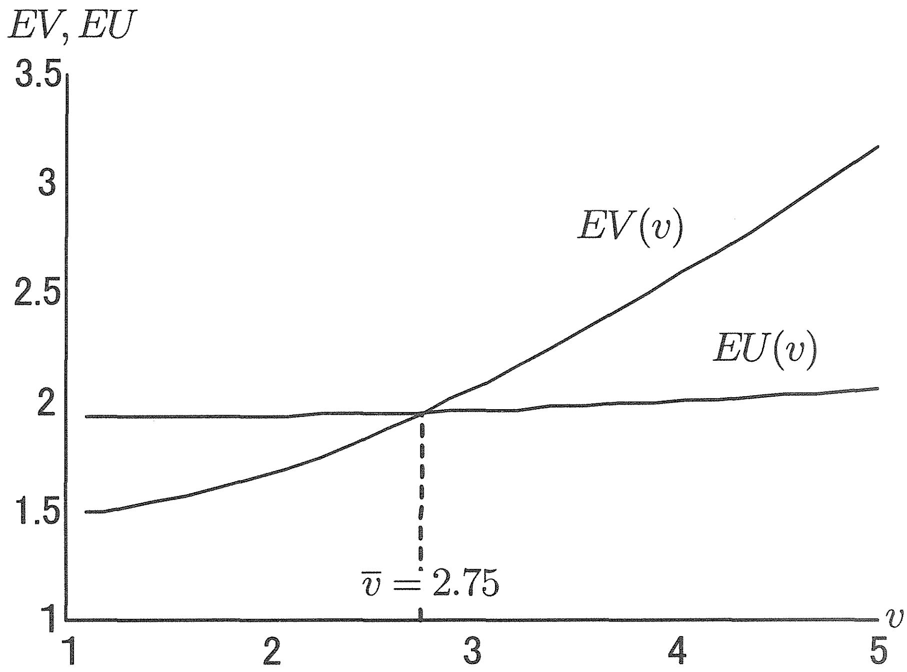
$$EV(v)=p_0\left\{\delta\left[v+\mu\exp\left(-\frac{\beta}{\mu}\right)\right]-c\right\}-\omega \tag{4.43a}$$

$$EU(v)=\delta\left\{\gamma+\mu\exp\left(-\frac{\gamma}{\mu}\right)\right\} \tag{4.43b}$$

と表せる（**付録III**参照）．式 (4.43a),(4.43b) より，$EV(\overline{v})=EU(\overline{v})$ が成立するような臨界的効用水準$\overline{v}$は不動点問題の解として与えられる．

4.5.2 計算結果

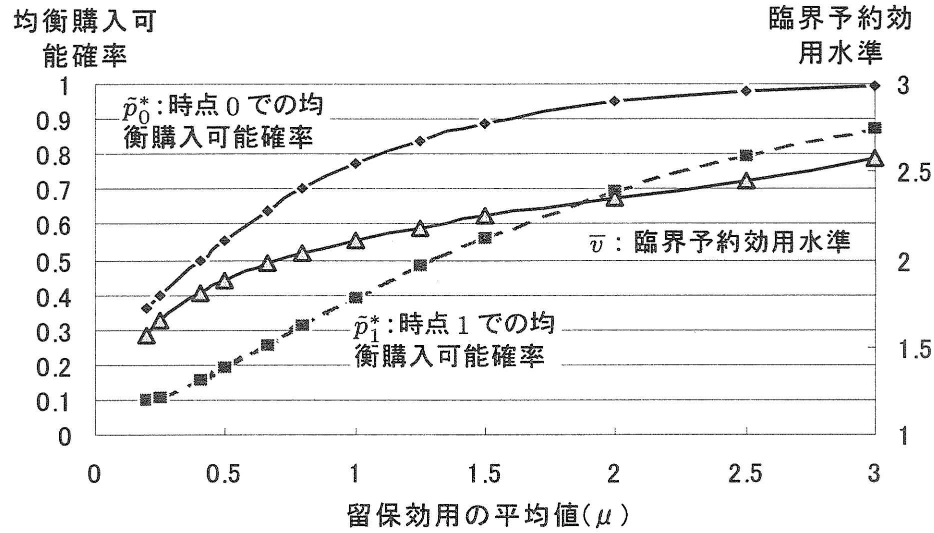
サービスに対する確定効用が $v^*=1$，確率効用項が標準正規分布 $N(0,1)$ に従って分布すると考える．また，留保効用のパラメータを$\mu=2$，チケット価格 $c=1$，取引費用$\omega=0.002$，キャンセルのペナルティ率$\alpha=0.1$，総家計数 $N=100$，サービスの供給数 $Q=10$，割引率$\delta=0.9975$ と設定した場合を標準ケースと考える．標準ケースは総家計数に対してサービスの供給数が非常に限定されており，予約を行わないとチケットを購入できなくなるリスクが無視できない程度大きいケースを想定している．**図－3** は基本ケースにおいて，購入可能確率を$\tilde{p}_0=0.8, \tilde{p}_1=0.2$ に設定した場合，vの値と対応して $EU(v), EV(v)$ がどのように変化するかを表したものである．**性質3** に示すようにvの値が大きくなるほど $EU(v)$，$EV(v)$ は単調に増加することが理解できる．$\overline{v}=2.75$ において $EU(\overline{v})=EV(\overline{v})$ が成立する．$v<2.75$ が成立するような客は，$EU(v)>EV(v)$ が成立するためサービスの予約を行わない．一方，$v\geq 2.75$ の場合，$EV(v)\geq EU(v)$ が成立しサービ



図－3　$EU(v)$ と $EV(v)$ の関係

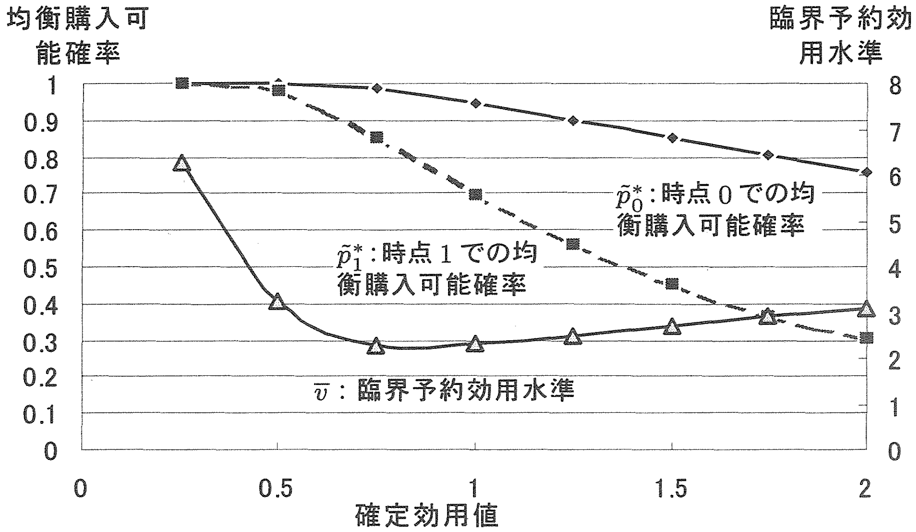
スの予約をする．以上の数値計算では家計の主観確率$\tilde{p}_0, \tilde{p}_1$を与件としていた．しかし，家計の主観的期待はすべての家計の予約行動の結果として内生的に決定されるものである．以下では，4．で提案した合理的期待均衡モデルを用いて，上述のようなパラメータ値の設定の下で，個人行動の結果として内生的に決定される合理的期待を数値計算により求めてみよう．

図－4は留保効用分布のパラメータμと，時点$t=0$の均衡購入可能確率$\tilde{p}_0^*$，時点$t=1$の均衡購入可能確率$\tilde{p}_1^*$，及び臨界予約効用水準$\overline{v}$の関係を表したものである．μ以外のパラメータ値は基本ケースの値に固定している．パラメータμは指数分布の平均および分散を表しており，μが大きくなるほど留保効用の平均値・分散が大きくなる．すなわち，家計はより多くの需要側のリスクに直面することになる．需要側のリスクが大きくなると，予約を行った場合の期待効用EVが予約を行わなかった場合の期待効用EUより相対的に小さくなり，臨界予約効用水準$\overline{v}$が増加する．その結果，時点$t=0$で予約を試みる家計数が減少し，時点$t=0$における購入可能確率に関する合理的期待$\tilde{p}_0^*$は大きくなる．同様に，時点$t=1$における均衡購入可能確率$\tilde{p}_1^*$が増加する．図－5は家計の確定効用v^*と，$\tilde{p}_0^*, \tilde{p}_1^*$，及び$\overline{v}$の関係を表したものである．図に示すように確定効用は臨界予約効用水準に複雑な影響を及ぼす．確定効用水準v^*が0.8の時，臨界予約効用水準は最小値をとる．確定効用水準が0.8より増加すれば期待効用EV，EUが増加する．期待効用が増加すれ



図－4　留保効用の平均・分散値と予約行動

ば，サービスを消費を試みようとする家計数が増加する．しかし，サービスの供給数が固定されているため，時点$t=0$，及び時点$t=1$における均衡購入可能確率$\tilde{p}_0^*$，$\tilde{p}_1^*$は減少する．一方，確定効用が0.8より小さくなれば，購入可能確率が1に漸近し，予約をしなくてもほぼ確実にサービスを購入することが可能となる．その結果，かなり大きな効用値を持つ家計のみが予約を試みることとなり，臨界予約効用水準が大きな値をとるようになる．図－6はキャンセル時のペナルティ率αと$\tilde{p}_0^*$，$\tilde{p}_1^*$，及び$\bar{v}$の関係を表したものである．ペナルティ率が大きくなると，キャンセルによる損失リスクが大きくなり，予約を行った場合の期待効用EVが減少する．したがって，より多くの家計が予約を留保することになり，均衡購入可能確率$\tilde{p}_0$は増加する．図に示すように，ペナルティ率の変化は時点$t=1$における家計の購入行動に対しては直接的な影響を与えないものの，時点$t=1$における均衡購入可能確率$\tilde{p}_1^*$に複雑な影響を及ぼすことになる．ペナルティ率の増加は予約した場合の期待効用EVを減少させ，臨界期待効用水準$\bar{v}$を増加させる．その結果，予約時点における予約確率が減少するため，より多くの家計が時点$t=1$においてチケットの購入を試みる．それと同時に，予約者数が減少するため時点$t=1$において利用可能なチケット数は増加する．この2つの効果が同時に機能するため，ペナルティ率の変化が時点$t=1$における均衡購入可能確率に及ぼす影響に関して定性的な結論を導くことはできない．本数値計算事例では，ペナルティ率が0.3の近傍で時点$t=1$における均衡購入可能確率が最小値をとる結果となっている．以上の数値計算事例で示したように，家計が直面する意思決定環境の特性に応じて臨界予約効用水

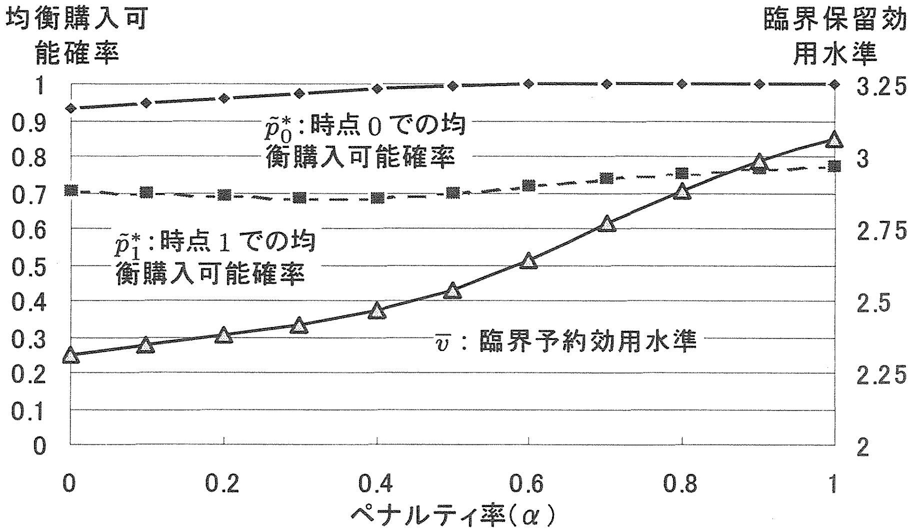


図－5　確定効用項と予約行動

準は多様に変化することが理解できる．予約確率モデル (4.20) における臨界予約効用水準$\bar{v}$は定数項でありえず，この水準は合理的期待均衡のメカニズムを通じて内生的に決定される．予約者数を推計するためには，臨界予約効用水準を内生変数として含むような予約確率モデル (4.20) の推計方法と臨界予約効用水準を内生的に決定できるような実用的な合理的期待均衡モデルを開発することが必要になると考える．

4.6　おわりに

本研究では，家計の将来のサービス消費に対する予約行動をモデル化する方法を提案した．予約システムの導入により，サービスに対してより大きな効用を持つ家計は事前にサービス消費を予約する誘因を持つ．したがって，予約システムの導入により，より大きな効用を有する家計に優先的にサービスが割り当てられることになり，サービスの割り当てメカニズムの効率化が図られる．本研究では，予約時点，利用時点という 2 つの離散的な時点のみを考慮するという極めて簡略化された問題設定であるが，家計の予約行動のモデル化と予約システムがもたらす効果に関して分析を試みた．本研究を通じて家計の予約行動モデルに関する 1 つの有効なプロトタイプを提示しえたと考えるが，今後に残された課題も多い．第 1 に，本研究では家計の予約行動の分析のみにとどまっているが，今後はサービス生産企業の行動も同時に考慮した市場均衡モデルの開発が必要である．現実には，事前割引制度等の多様な予約システムが導入されており，これらのシステムが社会的



図－6　キャンセル料率と予約行動

厚生に及ぼす影響を分析するためには，この種の市場均衡モデルの発展が不可欠である．さらに，予約システム導入の経済効果を分析する方法論を開発することも必要である．第2に，本研究では予約時点がある1時点だけに限定されるという極めて単純化された問題設定を行っていた．現実には，予約行動は随時行うことが可能であり，連続的時間次元を導入したような予約モデルを開発する必要があろう．第3に，経験的データを用いて予約確率モデルを推計する必要がある．すべての潜在的家計に対して予約行動に関するデータを獲得することは不可能であろう．一方，予約を行った家計，最終的にサービス消費を行った家計に関するデータは比較的容易に獲得できるものと考える．このように限られたデータに基づいて予約確率モデルを推計する方法を開発する必要がある．

付録Ⅰ 性質2の証明

EV, EUを再掲しておこう．

$$EV = \tilde{p}_0 \left\{ \delta \left(\beta G(\beta) + \int_{\beta}^{\infty} \varepsilon g(\varepsilon) d\varepsilon + c - \alpha c - \omega \right) - c \right\} - \omega$$

$$EU = \delta \left(\gamma G(\gamma) + \int_{\gamma}^{\infty} \varepsilon g(\varepsilon) d\varepsilon \right)$$

$\tilde{p}_0 = 1, \tilde{p}_1 < 1$，$\alpha c = 0, \omega = 0, \delta = 1$が成立する場合，$v > c$の仮定より$\beta - \gamma = (1 - \tilde{p}_1)(v - c) > 0$.

この時，

$$
\begin{aligned}
EV - EU &= \delta\left\{\beta G(\beta) + \int_{\beta}^{\infty} \varepsilon g(\varepsilon)d\varepsilon - \gamma G(\gamma) - \int_{\gamma}^{\infty} \varepsilon g(\varepsilon)d\varepsilon\right\} \\
&= \delta\left\{\int_{0}^{\infty} [\max(\beta,\varepsilon) - \max(\gamma,\varepsilon)]\, g(\varepsilon)d\varepsilon\right\}
\end{aligned}
$$

$\beta > \gamma$より$\max(\beta,\varepsilon) - \max(\gamma,\varepsilon) \geq 0$．したがって，$EV - EU \geq 0$が成立．$\tilde{p}_0 = 1, \tilde{p}_1 = 1$が成立する場合，$v \geq c + \omega$の仮定より$\beta - \gamma = \alpha c + 2\omega \geq 0$．$\max(\beta,\varepsilon) - \max(\gamma,\varepsilon) \leq \max(\beta - \gamma, 0)$が成立．したがって，

$$
\begin{aligned}
EU - EV \quad &\geq \delta\left\{\int_{0}^{\infty} [\max(\beta - \gamma, 0)]\, g(\varepsilon)d\varepsilon\right\} + (1-\delta)c + \delta\alpha c + (1+\delta)\omega \\
&\geq -\delta(\beta - \gamma) + (1-\delta)c + \delta\alpha c + (1+\delta)\omega \\
&= (1-\delta)(c+\omega) \geq 0
\end{aligned}
$$

すなわち，$EU - EV \geq 0$が成立．

付録II 性質3の証明

臨界効用$\beta = v - c + \alpha c + \omega, \gamma = \tilde{p}_1(v-c) - \omega$であり$v$の関数である．ここで，次式が成立する．

$$
\begin{aligned}
\frac{\partial EV}{\partial v} &= \delta\left\{\tilde{p}_0\frac{\partial\beta}{\partial v}G(\beta) + \beta\frac{\partial G(\beta)}{\partial v} - \beta g(\beta)\frac{\partial\beta}{\partial v}\right\} = \delta\tilde{p}_0 G(\beta) \geq 0 \\
\frac{\partial EU}{\partial v} &= \delta\left\{\frac{\partial\gamma}{\partial v}G(\gamma) + \gamma\frac{\partial G(\gamma)}{\partial v} - \gamma g(\gamma)\frac{\partial\gamma}{\partial v}\right\} = \delta\tilde{p}_1 G(\gamma) \geq 0
\end{aligned}
$$

したがって，次式が成立する．

$$
\frac{\partial(EV - EU)}{\partial v} = \delta(\tilde{p}_0 G(\beta) - \tilde{p}_1 G(\gamma)) \geq 0.
$$

また，$v \in (-\infty, \infty)$より

$$
\begin{aligned}
&\lim_{v\to\infty} EV = \lim_{v\to\infty} \tilde{p}_0\delta v - \tilde{p}_0 c - \omega = +\infty \\
&\lim_{v\to\infty} EU = \lim_{v\to\infty} \delta\{\tilde{p}_1(v-c) - \omega\} = +\infty \\
&\lim_{v\to 0} EV = \tilde{p}_0\left\{\delta\left[\int_{0}^{\infty} \varepsilon g(\varepsilon)d\varepsilon + c - \alpha c - \omega\right] - c\right\} - \omega \\
&\lim_{v\to 0} EU = \delta\int_{0}^{\infty} \varepsilon g(\varepsilon)d\varepsilon
\end{aligned}
$$

が成立する．一方，次式が成立することは明白．

$$\lim_{v\to\infty}(EV-EU)=\delta(\tilde{p}_0-\tilde{p}_1)v-(\tilde{p}_0-\delta\tilde{p}_1)c-(1-\delta)\omega=+\infty$$
$$\lim_{v\to 0}(EV-EU)=-(1-\tilde{p}_0)\delta\int_0^\infty \varepsilon g(\varepsilon)d\varepsilon-\tilde{p}_0\{(1-\delta)c+\delta\alpha c+\delta\omega\}-\omega<0$$

付録III 臨界予約効用水準の導出

εが指数分布に従う場合，$\lim_{\varepsilon\to\infty}\varepsilon\exp(-\mu\varepsilon)=0$であることを考慮すれば，

$$\begin{aligned}\int_\beta^\infty \varepsilon g(\varepsilon)d\varepsilon &= \left[-(\varepsilon+\mu)\exp\left(-\frac{\varepsilon}{\mu}\right)\right]_\beta^\infty \\ &=(\beta+\mu)\exp\left(-\frac{\beta}{\mu}\right)\end{aligned}$$

を得る．さらに，$G(\beta)=1-\exp(-\beta/\mu)$が成立．したがって，

$$EV=p_0\left\{\delta\left[v+\mu\exp\left(-\frac{\beta}{\mu}\right)\right]-c\right\}-\omega$$

が成立．同様に，

$$EU=\delta\left\{\gamma+\mu\exp\left(-\frac{\gamma}{\mu}\right)\right\}$$

が成立する．

参考文献

[1] 小林潔司編著：知識社会と都市の発展, 森北出版, pp.43-48, 1999.

[2] 酒井泰弘：不確実性の経済学, 有斐閣, 1982.

[3] Beckmann, M.J.: Decision and team problem in airline reservation, *Econometrica*, Vol. 26, pp. 134-145, 1958.

[4] Subramanian, J. and Stidham, S. Jr., and Lautenbacher, C. J.: Airline yield management with overbooking, cancellations, and no-shows, *Transportation Science*, Vol. 33, pp.147-167, 1999.

[5] Chatwin, R.: Continuous-time airline overbooking with time-dependent fares and refunds, *Transportation Science*, Vol. 33, 182-191.

[6] McGill, J. I. and Ryzin, G.J.V.: Revenue management: Research Overview and prospects, *Transportation Science*, Vol. 33, 233-256.

[7] Sherman, R. and Visscher, M.: Nonprice rationing and monopoly price structures when demand is stochastic, *The Bell Journal of Economics*, 13, pp.254-262, 1982.

[8] Harris, M. and Raviv, A.: A theory of monopoly pricing schemes with demand uncertainty, *The American Economic Review*, Vol. 71, pp.347-365, 1981.

[9] Carlton, D. W.: The theory of allocation and its implication for marketing and industrial structure: why rationing is efficient?, *Journal of Law & Economics*, Vol. XXXIV, pp. 231-261, 1991.

[10] Carlton, D. W.: Contracts, price rigidity, and market equilibrium, *Journal of Political Economy*, Vol. 87, pp.1034-1061, 1979.

[11] Gale, I. L. and Holmes, T. J.: Advance-purchase discounts and monopoly allocation of capacity, *The American Economic Review*, Vol.83, pp. 135-146, 1993.

[12] Dana, J. D. Jr.: Advance-purchase discounts and price discrimination in competitive markets, *Journal of Political Economy*, Vol. 106, pp.395-422, 1998.

[13] Arrow, K.J. and Fisher, A.C.: Environmental preservation, uncertainty, and irreversibility, *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 88, pp. 312-320, 1972.

[14] Henry, C.: Investment decisions under uncertainty: The irreversibility effect, *American Economic Review*, Vol. 64, pp.1006-1012, 1974.

[15] Conrad, J.M.: Quasi-option value and the expected value of information, *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 94, pp.813-820, 1980.

[16] Johansson, P.-O.: *The Economic Theory and Measurement of Environmental Benefits*, Cambridge University Press, 1987.

[17] Pindyck, R.S.: Irreversibility, uncertainty, and investment, *Journal of Economic Literature*, Vol. 29, pp.1110-1148, 1991.

[18] Schmutzler, A.: *Flexibility and Adjustment to Information in Sequential Decision Problem*, Springer-Verlag, 1991.

[19] 多々納裕一: 開発保留の便益と開発戦略, 応用地域学研究, No. 3, pp.21-32, 1998.

[20] Akerlof, G. A.: The economics of castle and of the rat race and other woeful tales, *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 90, pp. 599-617, 1976.

[21] 小林潔司, 藤高勝己: 合理的期待形成を考慮した経路選択モデルに関する研究, 土木学会論文集, 第458号/IV-18, pp.17-26, 1993.

5　予約システムの経済評価

5.1　はじめに

前章では予約制度における経済便益や価格設定および座席配分などの最適制御に関する定量的予測を行うためには家計と企業との相互関係を明示する必要があることを説明した．また家計はサービスを購入した場合においても予約をキャンセルする可能性があるという需要リスクと将来時点でサービスが購入できなくなる供給リスクに直面し，この2つの不確実性を同時に考慮してサービスの予約の意思決定を行うという予約行動の特徴を指摘した．そこで，家計の需要リスクと供給リスクを同時に考慮したサービスの予約行動をモデル化した．予約システムの導入によって，より大きな効用を有する家計に優先的にサービスが割り当てられることになり，サービスの割り当てメカニズムの効率化が図られる．この予約システムが内包する配分メカニズムを前提に，家計の予約行動のモデル化を下に家計の予約行動に関する分析を試みた．

同一な公共サービスを選好に異質性ある個人に割り当てる場合には，その配分手法によって消費者への配分結果およびその結果として実現する企業の収益は大きな影響を受ける [1)]．したがって予約制度を含包した最適なサービス配分問題および企業の収益管理 (Revenue Management) 問題に関する研究が多くの研究者によって行われてきた．しかし既存の研究では家計と企業が及ぼし合う影響については明示的にモデル化されていない．よって本章では，前章で定式化した予約行動モデルを用いて予約システムによる経済評価を多側面から検討することとする．

また同質的なサービスを異質性のある家計に割り当てる場合に，企業が事前購入割引制度を設けることによって効率的な配分がなされると考えられている．企業が事前購入割引を行う目的は供給量に見合うだけの需要量を引き出すことで利潤を増大させるためである [2)]．ところが，事前購入割引による社会的厚生の影響に関しては見解の一致を見るに至っていない．したがって，本章では事前購入割引に関する経済評価も合わせて行うこととする．

以下，**5.2** 節では，予約システムが自己選抜メカニズムとして機能し，サービスに対して相対的に大きな効用を持つ家計に配分することができるかどうかをサービスを割り当てられる家計全体のサービス効用の期待値を用いて示す．**5.3** 節では，オプション価格の概念を導入して予約システムが自己選抜メカニズムとして機能することによって発生する経済便益を測定する方法を提案し，予約システムが家計に及ぼす影響について考察する．**5.4** 節では，消費者余剰と企業利潤および社会的厚生に関する定式化を行い，予約システムの導入による影響について数値計算と通じて考察する．また消費者余剰・企業利潤・社会的厚生それぞれの最大化を図るために最適と考え

られる配分メカニズムを検討する．最後に**5.5節**において，本章全体のまとめを行うこととする．

5.2　予約システムと自己選抜

家計のサービスに対する選好に異質性があるような場合，サービスの最適な配分メカニズムを創出することが重要な課題となるが，一般的には家計のサービスに対する効用水準は私的情報であり，サービス供給者はその値を知ることができない．すなわち家計とサービス供給者の間には情報の非対称性が存在する．したがって市場はより効率的な配分を目指して，家計のサービス効用vを把握できるような選抜メカニズムを作り出す必要がある．そこで予約システムを導入するとより大きな効用を持つ家計にサービス購入の機会が割り当てられると考えられる．サービス効用vに関して期待効用$EV^*(v), EU^*(v)$が単調増加の性質を持つことから，予約システムにおける配分メカニズムを予約行動モデルで表現すると

$$\left.\begin{array}{ll}\text{予約する} & EV^*(v) \geq EU^*(v)\text{の時} \\ \text{予約しない} & EV^*(v) < EU^*(v)\text{の時}\end{array}\right\} \tag{5.44}$$

となる．これが「自己選抜の条件(self-selection constraint)」に他ならない[3)]．家計がサービスを予約するということは,「その家計が相対的に大きな効用水準を有している」という私的情報を表明していることになる．つまり予約システムの導入によって自分自身の私的情報を行動を通じて表明する自己選抜メカニズムが働く．その結果，サービス効用が相対的に大きい家計にサービスの割り当てを実現することが可能となる．

ただ自己選抜メカニズムが果たして適切な配分をもたらすかどうかは一概には言えない[4)]．例えば労働市場における自己選抜の場合においては，労働者の能力に関する異質性の存在を前提にして自己選抜と経済厚生について説明されるが，自己選抜メカニズムの導入により極度の分離均衡が成立すると最善の状態でないどころか，次善の最適解でない可能性もある[5)]．以上のことから，予約システムによる配分メカニズムが適切か検討する必要がある．

そこで配分すべき家計にどの程度分配されているかによって適正な配分メカニズムであるかどうかを評価する．ここで「配分すべき家計」とは時点$t=1$でサービスを利用する意思がある家計に対して，サービスを利用することによって得られる効用vが大きい家計のことであり，そのような家計に対してより多く配分することが望ましいことであるとする．その評価値として配分メカニズムに応じてサービスを割り当てられた家計のサービス効用vの期待値を用いる．このサービス効用vの期待値が大きいほど自己選抜メカニズムが機能することを表現している．

はじめに予約システムが存在する環境を想定して自己選抜の効果を測るためにサービスを利用

する家計のサービス効用vの期待値を求める．いま，すべての家計が購入可能確率に関して合理的期待を形成していると考える．予約システムが存在する環境においてはサービスを利用する形態として，1）時点$t=0$で予約に成功し時点$t=1$でキャンセルせず利用する，2）時点$t=0$では購入しなかったものの時点$t=1$で購入に成功するという2種類が考えられる．定式化の前提として，1つめのケースは予約に成功する確率は$\tilde{p}_0^*$であり，時点$t=1$で利用するために必要なキャンセルを行う臨界効用$\beta(v)$が留保効用εを上回る確率が$G(\beta(v))$であると考えられる．また2つめの事象は時点$t=1$で購入するのはサービスを購入するための最小の効用$\gamma(v)$が留保効用εを上回ることが必要であり，その確率は$G(\gamma(v))$と表されること，ならびにサービスの購入を試みる場合における購入可能確率は$\tilde{p}_1^*$であると考えられる．さらに時点$t=0$における予約の意思決定の基準は**命題**よりサービス効用vと臨界予約効用水準$\bar{v}$との比較であることを考慮して，サービス効用vが確率密度関数$f(v)$に従って分布する場合，予約システムにおいてサービスを利用する家計の効用の期待値$E[v]$は

$$E[v]=\frac{\int_{\bar{v}}^{\infty} v\tilde{p}_0^* f(v)G(\beta(v))dv+\int_{\gamma^{-1}(0)}^{\bar{v}} v\tilde{p}_1^* f(v)G(\gamma(v))dv}{\int_{\bar{v}}^{\infty} \tilde{p}_0^* f(v)G(\beta(v))dv+\int_{\gamma^{-1}(0)}^{\bar{v}} \tilde{p}_1^* f(v)G(\gamma(v))dv} \tag{5.45}$$

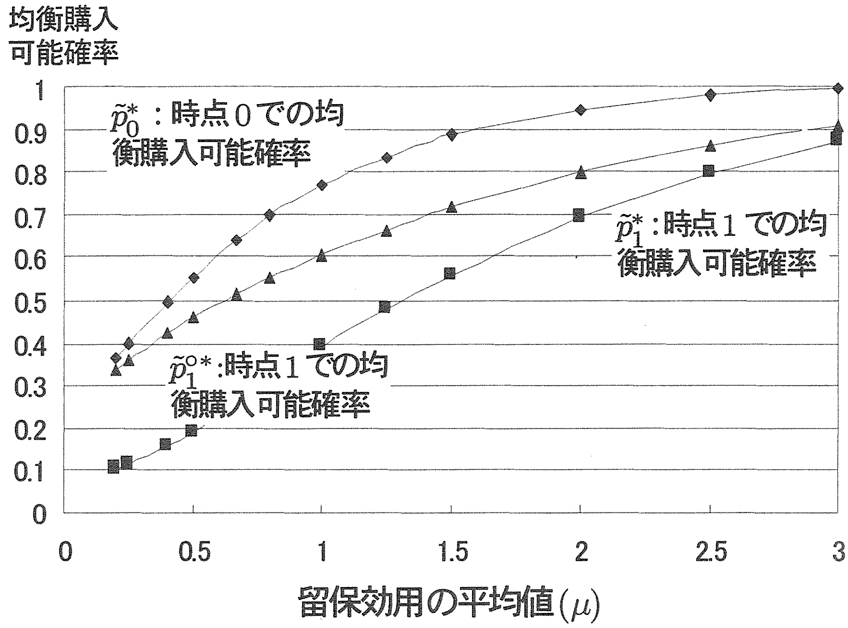
と表現できる．ここで$\gamma^{-1}(0)$は$\gamma(v)=0$となるvである．

次に予約システムが有効に自己選抜の機能として働いているか検討するために予約システムが存在しない場合との比較を行う．予約システムのない状態を基準状態と定義しよう．基準状態では，家計は時点$t=0$においてサービスを予約できない．サービス直前の時点$t=1$でサービスを購入するか否かという選択のみが可能である．前章の予約システムにおける合理的期待の導出と同様に主観的期待$p_1(\tilde{p}_1^\circ)$を与件として客観的確率$\tilde{p}_1^\circ$が導かれ，最終的に各購入可能確率が合理的期待均衡に収束すると仮定する．以下では予約システムが存在しない場合に家計が形成した合理的期待の下で成立する均衡下での購入可能確率$\tilde{p}_1^{\circ *}$を定式化する．ここで，上付き記号$\circ$は予約システムがない場合を表わすこととする．時点$t=1$において購入する意思を持つ確率ψが式(4.32)で定義されることに着目しよう．この時，n人の家計が時点$t=1$においてサービスを購入しようという意思を持つ確率$R^\circ(n)$は

$$R^\circ(n)=\frac{N!}{n!(N-n)!}\xi^n(1-\xi)^{N-n} \tag{5.46}$$

である．ここで基準状態において家計が購入を試みる確率ξは

$$\xi=\int_{\gamma^{\circ-1}(0)}^{\infty} f(v)G(\gamma^\circ(v))dv \tag{5.47}$$



図－1 予約システムと基準状態の均衡購入可能確率

として与えられる．ただし，$\gamma^{\circ}(0)$ は $\gamma^{\circ -1}(v)=0$ となる v である．ここで $\gamma^{\circ}(v)=\tilde{p}_1^{\circ}(v-c_1)-\omega$ とする．時点 $t=1$ においてチケットの購入を希望する人数の期待値 $E[n]$，および時点 $t=0$ においてチケットを購入できる人数の期待値 $E[n^*]$ は以下のように表現できる．

$$E[n] = \sum_{n=0}^{N} nP(n) \tag{5.48}$$

$$E[n^*] = \sum_{n=0}^{Q} nP(n) + \sum_{n=Q+1}^{N} QP(n) \tag{5.49}$$

時点 $t=1$ で購入希望者が n 人の場合の購入可能確率 $p_1^{\circ}(n)$ は

$$p_1^{\circ}(n) = \begin{cases} 1 & n \leq Q \text{の時} \\ \frac{Q}{n} & n > Q \text{の時} \end{cases} \tag{5.50}$$

と表されるので，主観的期待 $\tilde{p}_1^{\circ}$ の下で時点 $t=1$ に実現する購入可能確率の期待値 $p_1^{\circ}(\tilde{p}_1^{\circ})$ は

$$p_1^{\circ}(\tilde{p}_1^{\circ}) = \sum_{n=0}^{Q} R^{\circ}(n) + \sum_{n=Q+1}^{N} R^{\circ}(n)\frac{Q}{n} \tag{5.51}$$

式 (??) と同様に $p_1^{\circ *}(\tilde{p}_1^{\circ *}) = \tilde{p}_1^{\circ *}$ を満足する $\tilde{p}_1^{\circ *}$ として定義できる．

ここで予約システムと基準状態それぞれにおける均衡購入可能確率の関係を数値計算事例により考察する．パラメータ値は前章において設定した標準ケースと同様とする．すなわちサービスに対する確定効用が $v^* = 1$，確率効用項が標準正規分布 $N(0,1)$ に従って分布し，留保効用のパ

ラメータを$\mu=2$，チケット価格$c_t=c=1$，取引費用$\omega=0.002$，キャンセルのペナルティ率$\alpha=0.1$，総家計数$N=100$，サービスの供給数$Q=10$，割引率$\delta=0.9975$と設定する．本節においても固定価格を前提として考察する．**図－1**は留保効用εのパラメータμと予約システム下での時点$t=0$と時点$t=1$における均衡購入可能確率$\tilde{p}_0^*,\tilde{p}_1^*$および基準状態における均衡購入可能確率$\tilde{p}_1^{\circ *}$の関係を表したものである．この結果を含めて一般的に予約システムにおいて時点に関わらず同一価格を設定するという条件の下では基準状態の購入可能確率$\tilde{p}_1^{\circ *}$は購入可能確率$\tilde{p}_0^*,\tilde{p}_1^*$の間になる．ただし，事前購入割引など価格の差別化を行う場合にはこの限りではない．

基準状態における合理的期待均衡の定式化を下に基準状態におけるサービス効用vの期待値を導出する．基準状態においては時点$t=1$で始めて購入の意思決定が行われるが，時点$t=1$で購入するのはサービスを購入するための最小の効用$\gamma^\circ(v)$が留保効用εを上回ることが必要であることからその確率は$G(\gamma^\circ(v))$と表され，その場合における購入可能確率は$\tilde{p}_1^{\circ *}$であると考えられる．従って基準状態においてサービスを利用する家計のサービス効用vの期待値$E^\circ[v]$は式(5.45)の右辺の分母および分子の第2項と同様に表される．

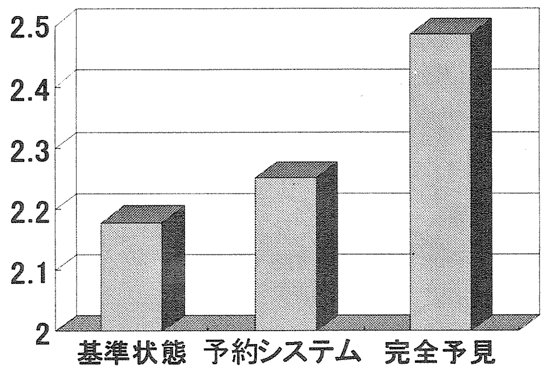
$$\begin{aligned}E^\circ[v] &= \frac{\int_{\gamma^{\circ-1}(0)}^{\infty} v\tilde{p}_1^{\circ *} f(v)G(\gamma^\circ(v))dv}{\int_{\gamma^{\circ-1}(0)}^{\infty} \tilde{p}_1^{\circ *} f(v)G(\gamma^\circ(v))dv} \\ &= \frac{\int_{\gamma^{\circ-1}(0)}^{\infty} vf(v)G(\gamma^\circ(v))dv}{\int_{\gamma^{\circ-1}(0)}^{\infty} f(v)G(\gamma^\circ(v))dv} \qquad (5.52)\end{aligned}$$

最後に完全予見における配分について考察する．またある選抜メカニズムにより結果的に完全予見と同一の配分となった場合を考えてもよい．ここでの完全予見とは，時点$t=1$において個人のサービス効用vおよび留保効用εに関する情報が完全に企業が把握するという極端な状況である．この条件下で企業は時点$t=1$で購入しサービスを利用する意思がある家計から効用が高い順に容量が飽和するまで割り当てる．サービスを必要とする家計はサービスを行使することによる効用$(v-c_1-\omega)$が留保効用εを上回ることが必要なので，その確率は$G(v-c_1-\omega)$となる．よってサービスが配分される家計のうちで最小のサービス効用$\ddot{v}$は次式を満たす必要がある．

$$\int_{\ddot{v}}^{\infty} f(v)G(v-c_1-\omega)dv = \frac{Q}{N} \qquad (5.53)$$

以上から完全予見におけるサービスを利用することによる効用の期待値$E_\circ[v]$は式（5.52）と同様にして

$$E_\circ[v] = \frac{\int_{\ddot{v}}^{\infty} vf(v)G(v-c_1-\omega)dv}{\int_{\ddot{v}}^{\infty} f(v)G(v-c_1-\omega)dv} \qquad (5.54)$$

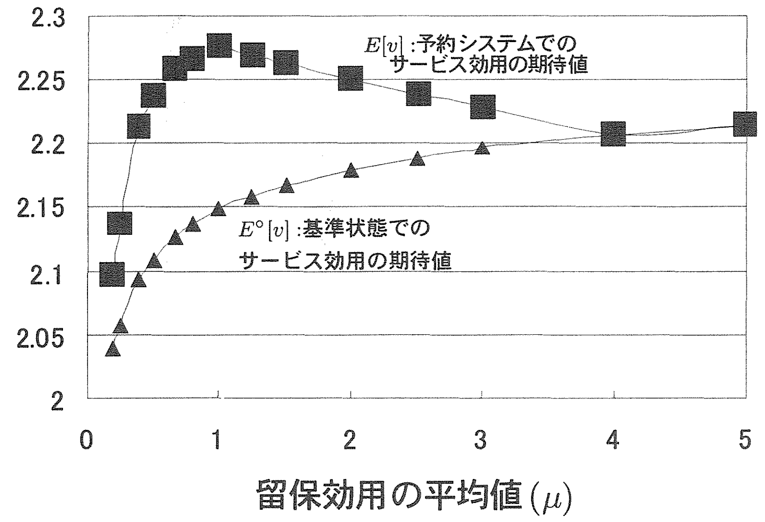


図－2 自己選抜メカニズムの効果

と表される．各配分メカニズムにおけるサービスを利用する家計のサービス効用vの期待値を標準ケースを用いた数値計算を行った結果が**図－2**である．予約システムでは完全予見による配分ほどには家計を選別できないが，基準状態と比べると自己選抜メカニズムが働くことが明らかになる．

以下では各変数とサービス効用の期待値との関係を考察する．**図－3**は留保効用εのパラメータμと予約システムおよび基準状態のサービスを利用する家計のサービス効用vの期待値$E[v], E^{\circ}[v]$を表したものである．常に予約システムが存在する場合の方が基準状態よりサービスを実際に利用する家計のサービス効用の期待値が大きいことから，より自己選抜メカニズムとして機能している．一般的に留保効用のパラメータμが大きくなるとよりサービス効用vが高い家計に選別されるのでサービス効用の期待値$E[v], E^{\circ}[v]$は増加する．しかし留保効用のパラメータμがある値（このケースでは$\mu = 1$）を超えると予約システムでのサービス効用vの期待値$E[v]$が減少するのは，時点$t = 0$における均衡購入可能確率$\tilde{p}_0^*$が1に漸近するに従って購入できなくなるという供給リスクよりもキャンセルを行うという需要リスクの影響が大きくなるためであり，その結果次第に基準状態に近づくと考えられる．

図－4および**図－5**は家計の確定効用v^*もしくは確率効用の分散σ^2と予約システムおよび基準状態のサービスを利用する家計のサービス効用vの期待値$E[v], E^{\circ}[v]$との関係を表したものである．何れの場合においても各変数の増加とともに相対的にサービス効用vが高い家計が増加するためにサービス効用の期待値$E[v], E^{\circ}[v]$も増加する．また各変数が大きくなり，サービス効用の高い家計の増加とともに$E[v]$と$E^{\circ}[v]$の差が大きくなることから，予約システムが自己選抜メカ

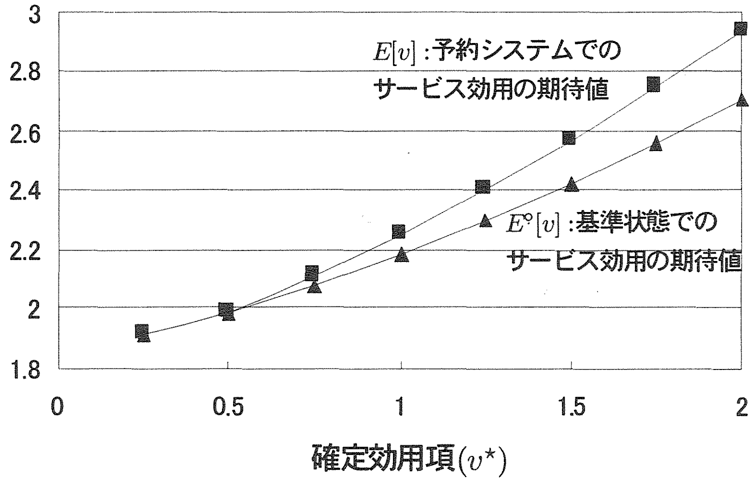


図－3 留保効用と自己選抜

ニズムとしてより働くようになると考えられる．

図－6はキャンセル料のペナルティ率αと予約システムおよび基準状態のサービスを利用する家計のサービス効用vの期待値$E[v], E^\circ[v]$を表したものである．ペナルティ率αの増加とともにαが0.4の近傍まではより高いサービス効用を持つ家計のみが購入しようとするためにペナルティ率αの増加とともに$E[v]$は増加するが，αが0.4を上回ると予約を行ってもキャンセルと行う際に負担する需要リスクが大きくなるために$E[v]$は減少し，予約を見送る家計が大多数となり基準状態に漸近する．

最後に事前購入割引も含めた価格政策のよる自己選抜が機能するメカニズムについて検討する．ここで取り上げる状況は第1に基準状態すなわち時点$t = 1$のみに価格cでサービスを配分する方法，第2として予約システムを導入するが固定価格cで配分する方法，最後に事前購入割引を導入し，時点$t = 1$には他の場合と同様に価格$c_1 = c$で販売するが，時点$t = 0$には割引価格c_0で割り当てるという手法である．数値計算事例では価格$c_0 = 1$に固定している．また事前購入割引を導入した場合におけるサービスを利用する家計のサービス効用の期待値を$E_1[v]$とする．**図－7**は予約システムおよび基準状態における固定価格cと事前購入割引における時点$t = 1$での価格c_1と各状態におけるサービスを利用する家計のサービス効用vの期待値$E[v], E^\circ[v], E_1[v]$の関係を表したものである．価格が上昇すると相対的にサービス効用の高い家計しか購入しようとしないので期待値$E[v], E^\circ[v], E_1[v]$は増加するが，サービスを購入しようとする家計が減少するために



図－4 確定効用項と自己選抜

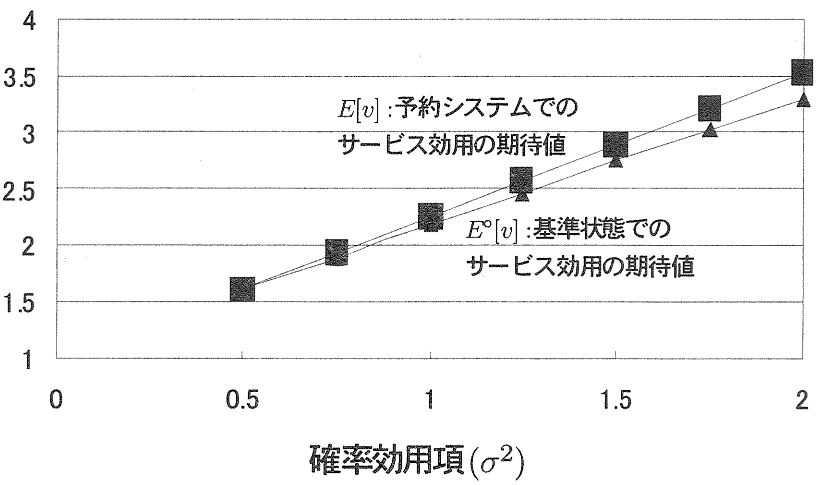
次第に $E[v]$ と $E^{\circ}[v]$ の差が小さくなることから，自己選抜メカニズムがあまり機能しないようになる．また事前購入割引における期待値 $E_1[v]$ は期待値 $E[v], E^{\circ}[v]$ を上回ることから，事前購入割引によってよりサービス効用の高い家計にサービスを割り当てられることを表している．

以上の結果から，一般的には予約システムの導入によってより高いサービス効用を持つ家計に配分されるが，予約システムにおける時点 $t=0$ における均衡購入可能確率 $\tilde{p}_0^{*}$ が 1 にほぼ等しい場合には予約を行う家計が極めて少ないために，基準状態とほとんど変わらない環境であることから自己選抜メカニズムがあまり機能しないことが分かる．

ところで予約システムでのサービスを利用する家計のサービス効用 v の期待値 $E[v]$ が $E^{\circ}[v]$ を上回るという結果から直ちに予約システムによって適切な配分がなされているとは必ずしも言い切れない．本節の分析はあくまでもサービスを利用することとなる家計に限定されているだけであり，サービスを利用しない家計の影響を全く考慮していない．よって次節では期待効用の概念を用いて，全ての家計を考慮した経済評価を行うための指標を導入することとする．

5.3 予約システムの経済価値

不確実性下における経済便益を測定する指標は無数に存在する [6)7)8)] が，本節では非状況依存的変分（オプション価格）を用いて，予約システムがもたらす自己選抜機能の経済便益を測定する方法を提案する．本研究においては線形効用関数 (4.1) を用いているため，他の評価法を採用しても同様の結果が得られる．はじめに予約システムの存在下における意思決定環境に対する合理



図－5 確率効用項と自己選抜

的期待効用$E[W^*]$は$EV^*(v)$，$EU^*(v)$を用いて

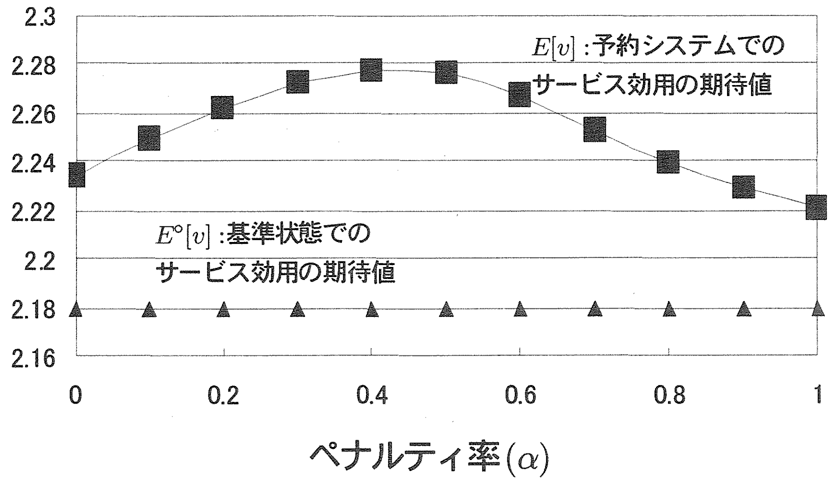
$$E[W^*] = E[\max\{EV^*(v), EU^*(v)\}] = \int_{-\infty}^{\overline{v}} EU^*(v)f(v)dv + \int_{\overline{v}}^{\infty} EV^*(v)f(v)dv \tag{5.55}$$

と表される．ただし，$\overline{v}$は臨界予約購入水準である．期待効用$E[W^*]$を計測するためには，式(5.55)に従って数値積分を行う必要がある．

次に基準状態における合理的期待効用を定式化する．基準状態では，家計は時点$t=0$においてサービスを予約できない．サービス直前の時点$t=1$でサービスを購入するか否かという選択のみが可能である．したがって，時点$t=0$における意思決定環境における基準状態における経済便益は，家計の合理的期待効用$EU^{\circ *}(v)$を用いて評価できる．合理的期待効用$EU^{\circ *}(v)$は式(??)において，$\gamma(v)$を$\gamma^{\circ}(v) = \tilde{p}_1^{\circ}(v-c) - \omega$に置換することにより定義できる．またを$\gamma^{\circ}(v) < 0$となるようなサービス効用$v$を持つ家計，すなわち$v < \gamma^{\circ -1}(0)$を満たす場合には式（??）と同じである．基準状態における家計の合理的期待効用$EU^{\circ *}(v)$を用いて，基準状態における合理的期待効用$E[W^{\circ *}]$は次式によって記述できる．

$$E[W^{\circ *}] = \int_{-\infty}^{\infty} EU^{\circ *}(v)f(v)dv \tag{5.56}$$

予約システムによる自己選抜機能の経済価値は予約システムの下で達成される合理的期待効用と基準状態における合理的期待効用の差として表現される．すなわち，予約システムの経済価値



図－6 ペナルティ率と自己選抜

（オプション価格）ΔWは次式のように定義される．

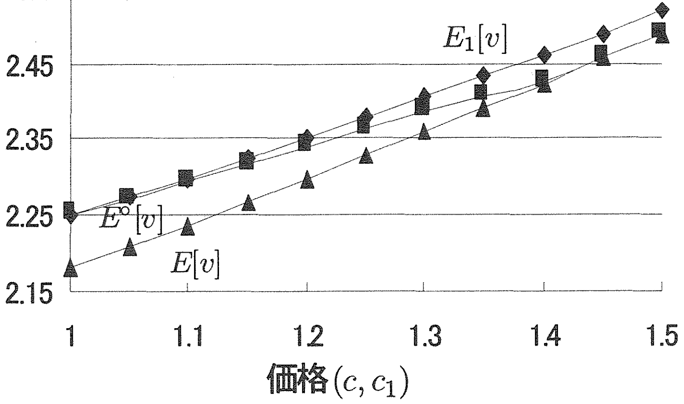
$$\Delta W = E[W^{*}] - E[W^{\circ *}] \tag{5.57}$$

本節におけるパラメータも標準ケースと同様とする．すなわちサービスに対する確定効用が $v^{\star} = 1$，確率効用項が標準正規分布 $N(0,1)$ に従って分布し，留保効用のパラメータを$\mu = 2$，チケット価格 $c_t = c = 1$，取引費用$\omega = 0.002$，キャンセルのペナルティ率$\alpha = 0.1$，総家計数 $N = 100$，サービスの供給数$Q = 10$，割引率$\delta = 0.9975$と設定する．**図－8** は標準ケースにおけるキャンセルのペナルティ率αを変化させた場合のオプション価格を表したものである．価格に対して0.2〜0.5％程度と微小ではあるものの任意のペナルティ率αにおいて予約システムによる経済価値は負となることが明らかになる．そこでオプション価格を予約を試みる家計に帰属するものと予約を行わない家計に帰属するものの２つに分割する．はじめに，時点$t = 1$に予約を行う家計，すなわち当該サービスを行うことによって得られる効用が臨界予約効用水準を上回る（$v \geq \overline{v}$）家計の経済価値ΔYは式(5.55)〜(5.57)と同様にして次式のようになる．

$$\Delta Y = \int_{\overline{v}}^{\infty} EU^{*}(v)f(v)dv - \int_{\overline{v}}^{\infty} EU^{\circ *}(v)f(v)dv \tag{5.58}$$

またサービス効用が臨界予約効用水準を下回る（$v \leq \overline{v}$）家計についても式（5.58）と同様にして経済価値ΔZが与えられる．

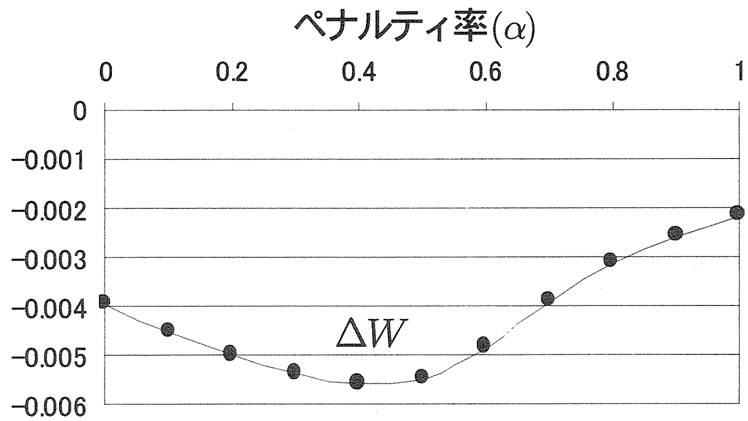
$$\Delta Z = \int_{-\infty}^{\overline{v}} EV^{*}(v)f(v)dv - \int_{-\infty}^{\overline{v}} EV^{\circ *}(v)f(v)dv \tag{5.59}$$



図－７ 価格と自己選抜

留保効用εのパラメータμ，家計の確定効用v^*，確率効用の分散σ^2，キャンセル料のペナルティ率αおよび固定価格cとΔWならびに$\Delta Y, \Delta Z$を数値計算したものが図－９～１３である．これらの数値計算事例から予約を試みる家計にとっては予約システムは正の便益をもたらす一方，予約を行わない家計にはそれを上回る負の便益をもたらすために，全体のオプション価格は負になることが明らかになる．非予約家計の経済価値が負になる最大の原因は基準状態から予約システムへと移行することによって，効用の高い家計が先に予約してしまうために，予約を見送る家計が利用直前に購入できる確率が減少してしまう．また，予約を試みる家計すなわち臨界効用水準$\bar{v}$を上回る家計$(v \geq \bar{v})$においても，キャンセルを行うことによるリスクを負っているために期待効用が減少してしまうことが大きいと考えられる．以上のメカニズムは図－１４において曲率が購入可能確率と対応すること，および予約を試みるほどサービス効用水準が高い家計$(v \geq \bar{v})$においても基準状態に比べて期待効用が下がる場合がある$(EV^*(v) < EU^{\circ *}(v))$ことからも明らかになる．

また経済価値$\Delta W, \Delta Y, \Delta Z$の関係を数値計算結果から検討する．一般的に$\Delta W$が増加すると$\Delta Y$は減少し，$\Delta Z$が増加し，この逆も成立する．また前節で取り上げた自己選抜による効果$E[v]-E^{\circ}[v]$と経済価値ΔYの間には大きな関連がある．例えば図－９では留保効用εのパラメータμが１の近傍において$E[v]-E^{\circ}[v]$とΔYが極大値を取る．これらの結果から明らかになるのは予約システムの導入によって自己選抜メカニズムが大きく働くほど，予約を行う家計には期待効用の増加を一層もたらすものの，予約を行わない家計はより期待効用の損失が大きくなり，全体としても負の効果を及ぼすということである．その一方で自己選抜が働かない，すなわち予約システムでの均



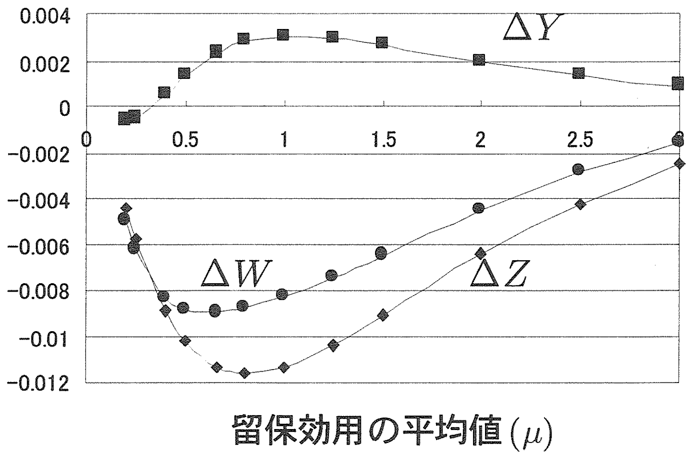
図－8 ペナルティ率とオプション価格

衡購入可能確率$\tilde{p}_0^*, \tilde{p}_1^*$がそれぞれ1に漸近するような場合にはオプション価格は0に収束する．

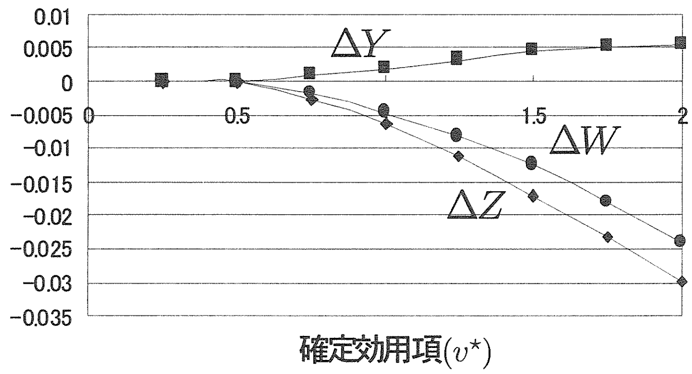
このように大半の事例においてオプション価格が負となるものの，例外的に事前購入割引の導入によってオプション価格が正となる場合が存在する．ここでパラメータ設定は前章で行ったものと同様とする．すなわち，第1に基準状態すなわち時点$t=1$のみに価格cでサービスを配分する方法，第2に予約システムを導入するが固定価格cで配分する方法，第3としては事前購入割引を導入し，時点$t=1$には他の場合と同様に価格$c_1=c$で販売するが，時点$t=0$には割引価格$c_0=1$で割り当てるという手法である．**図－15**は時点$t=1$における価格c_1とΔWならびに$\Delta Y, \Delta Z$の関係である．時点$t=1$における価格c_1が1.3を上回るとΔWが正となる．この要因としてサービスを予約する家計が負担するサービス価格が$c>1$から事前購入割引価格$c_0=1$に減少し，予約を試みる家計が獲得する消費者余剰が増加することが一因として挙げられる．

先述したようにオプション価格が負になる要因の1つとして購入可能確率の大小関係が挙げられる．ここでオプション価格が予約システム下と基準状態それぞれにおける合理的期待効用の差で表されることから，予約システム下と基準状態におけるそれぞれの期待効用の格差に着目してオプション価格が負になる要因ついて検討する．簡便化のため以下の考察において価格は固定$(c_t=c)$とする．

サービス効用が臨界効用水準を上回る家計（$v \geq \bar{v}$）においては$EV^*(v) \geq EU^*(v)$であること



図－9 留保効用と経済価値

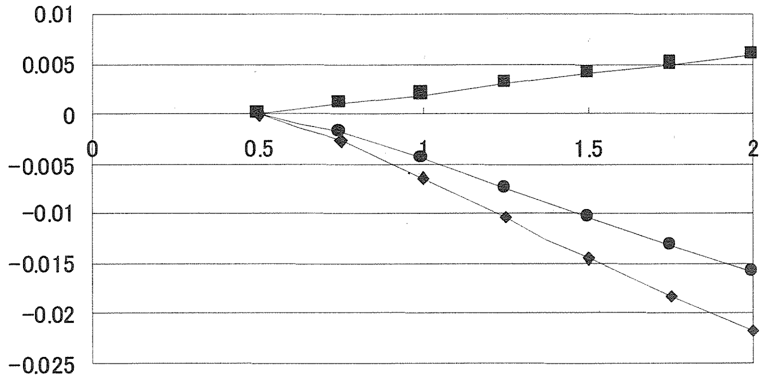


図－１０ 確定効用項と経済価値

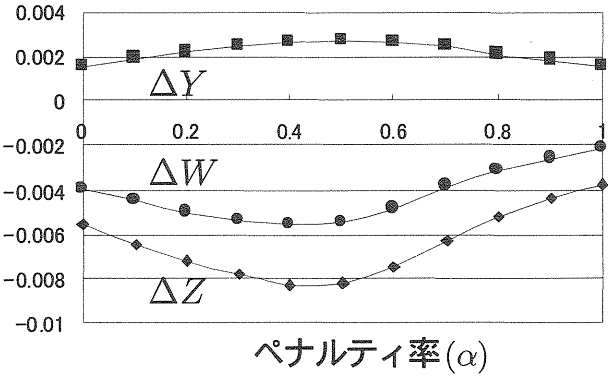
から $EV^*(v)$ と $EU^{\circ *}(v)$ の関係に着目して，説明可能な項に分解すると

$$
\begin{aligned}
EV^*(v) - EU^{*\circ}(v) &= \delta(\tilde{p}_0^* - \tilde{p}_1^{\circ *})(v-c)\int_0^{\gamma^\circ(v)} g(\varepsilon)d\varepsilon \\
&+ \delta\left[\{\tilde{p}_0^*(v-c)-\omega\}\int_{\gamma^\circ(v)}^{\beta(v)} g(\varepsilon)d\varepsilon - \int_{\gamma^\circ(v)}^{\beta(v)} \varepsilon g(\varepsilon)d\varepsilon\right] \\
&- \delta\left[(1-\tilde{p}_0^*)\int_{\beta(v)}^{\infty} \varepsilon g(\varepsilon)d\varepsilon + \omega\int_{\beta(v)}^{\infty} g(\varepsilon)d\varepsilon\right] \\
&- \delta\tilde{p}_0^*(\alpha c+\omega)\int_{\beta(v)}^{\infty} g(\varepsilon)d\varepsilon \\
&- (1-\delta)(\tilde{p}_0^* c - \omega) \qquad (5.60)
\end{aligned}
$$

となる．



図－１１ 確率効用項と経済価値

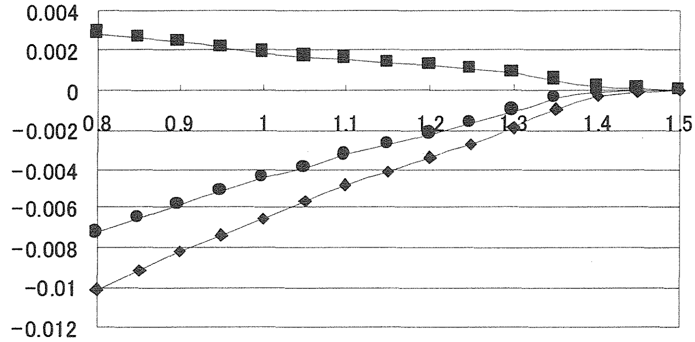


図－１２ ペナルティ率と経済価値

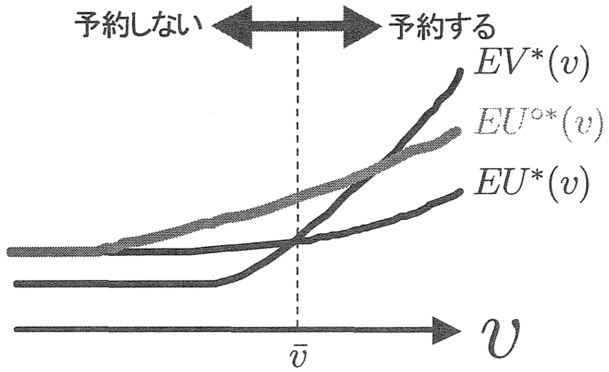
それぞれの項が表す内容を検討すると，右辺第１項は基準状態においても購入を希望する家計 $(0 \leq \varepsilon \leq \gamma^{\circ}(v))$ における購入可能確率が$\tilde{p}_1^{\circ *}$から$\tilde{p}_0^{*}$に増加することによる期待効用の増加を表現している．$v - c \geq 0$が成立するため第１項は必ず正となる．

第２項は予約システム下ではサービスを利用するが，基準状態ではサービスを利用しない家計 $(\gamma^{\circ}(v) < \varepsilon \leq \beta(v))$ における期待効用の変化を表している．$\varepsilon = \beta(v)$ においては $\{\tilde{p}_0^{*}(v-c) - \omega\}g(\beta(v)) - \beta(v)g(\beta(v)) > 0$ となり予約システムの導入により正の効果を及ぼすが，$\varepsilon = \gamma^{\circ}(v)$ においては $\{\tilde{p}_0^{*}(v-c) - \omega\}g(\gamma^{\circ}(v)) - \gamma^{\circ}(v)g(\gamma^{\circ}(v)) < 0$ が成立し，負の影響を与える．したがって状態の変化の正負については一概には言えない．

第３項は例え購入できた際にも結局キャンセルする家計 $(\varepsilon > \beta(v))$ が購入できなかった場合の



図－１３ 固定価格と経済価値



図－１４ 期待効用とサービス効用の関係

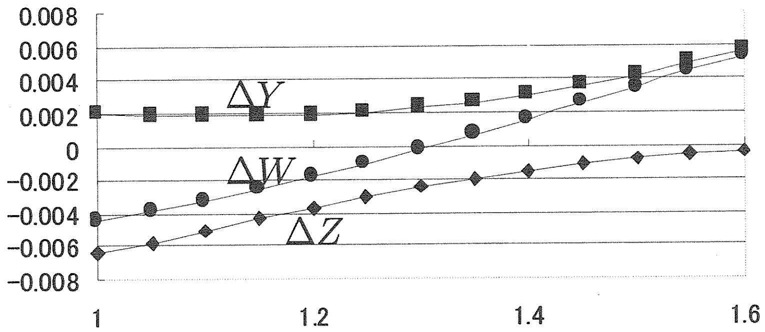
効用の損失を表している．

第４項は仮に予約購入できた場合にキャンセルする家計が基準状態ならば負担する必要が生じなかったキャンセル料を支払うことによる損失を表している．

第５項は基準状態においては時点$t=1$で購入の意思決定を行っていたものが予約システムの導入で時点$t=0$に購入する必要が生じたために家計の負担が増大することを表現している．

したがって予約システムの導入により確実に正の効果を及ぼしているのは第１項のみであり，第３～５項は負の効果を与えるために予約システムの導入によって予約を行うほどサービス効用が高い家計においても全体としてはマイナスの影響を及ぼす可能性があることが分かる．

次にサービスの予約を行わない家計（$v<\bar{v}$）においては$EV^*(v)<EU^*(v)$であることから



図－１５ 事前購入割引におけるオプション価格

$EU^*(v)$ と $EU^{\circ *}(v)$ の関係に着目して，説明可能な項に分解すると

$$\begin{aligned} EU^*(v) - EU^{\circ *}(v) &= \delta(\tilde{p}_1^* - \tilde{p}_1^{\circ *})(v-c)\int_0^{\gamma(v)} g(\varepsilon)d\varepsilon \\ &+ \delta\left[\int_{\gamma(v)}^{\gamma^\circ(v)} \varepsilon g(\varepsilon)d\varepsilon - \{\tilde{p}_1^{\circ *}(v-c)-\omega\}\int_{\gamma(v)}^{\gamma^\circ(v)} g(\varepsilon)d\varepsilon\right] \end{aligned} \tag{5.61}$$

となる．それぞれ，右辺第１項は時点 $t=1$ には購入する意思がある家計 $(0 \leq \varepsilon \leq \gamma(v))$ が予約システムの導入により購入可能確率が $\tilde{p}_1^{\circ *}$ から $\tilde{p}_1^*$ に減少することによる期待効用の減少を表す．第２項は基準状態では購入していたものが予約システムの導入により時点 $t=1$ に購入を見送る家計 $(\gamma(v) < \varepsilon \leq \gamma^\circ(v))$ が状態の変化により購入しなくなることによる期待効用の損失を表現している．

ただし，$\gamma^{\circ -1}(0) \leq v < \gamma^{-1}(0) < \bar{v}$ となるような v については

$$EU^*(v) - EU^{\circ *}(v) = \delta\left[\int_0^{\gamma^\circ(v)} \varepsilon g(\varepsilon)d\varepsilon - \{\tilde{p}_1^{\circ *}(v-c)-\omega\}\int_0^{\gamma^\circ(v)} g(\varepsilon)d\varepsilon\right] \tag{5.62}$$

となる．この格差は式（5.61）の右辺第２項と同様である．また $v < \gamma^{\circ -1}(0)$ となるような v については期待効用 $EU^*(v), EU^{\circ *}(v)$ は同一になるので基準状態から予約システムへ移行しても期待効用は増減しない．

以上からオプション価格 ΔW がサービス効用 v が異なる家計について期待効用を用いて集計化する限りにおいては，必要性の高い家計においては予約システムの導入によって購入可能確率が上昇することによる期待効用の増加よりも，キャンセル料の負担のリスクを背負うだけでなく早く購入することによる負担の増加が大きいこと，また予約を行うほどサービス効用が高くない家計には購入する機会の減少による期待効用の減少という負の側面が強く出るためにオプション価格

が負になるということが明らかになる．すなわち，予約システムの機能が働くことによって，早期に購入の意思決定を迫られることとなり，サービス効用の高い家計はより確実に購入できるようになり供給リスクが小さくなるが，それ以上にキャンセルを行う可能性という需要リスクに晒されるようになるためにオプション価格が負となるのである．オプション価格は家計が得る期待効用の変化を集計化したものであり，サービス消費に対する効用は式(4.1)で表現されることから，オプション価格が負になることを言い換えれば予約システムの導入によって消費者余剰が減少するということを表している．すなわち予約システムの導入が家計にとっては必ずしも望ましいシステムとは言えないということになる．

5.4 予約システムと社会的厚生

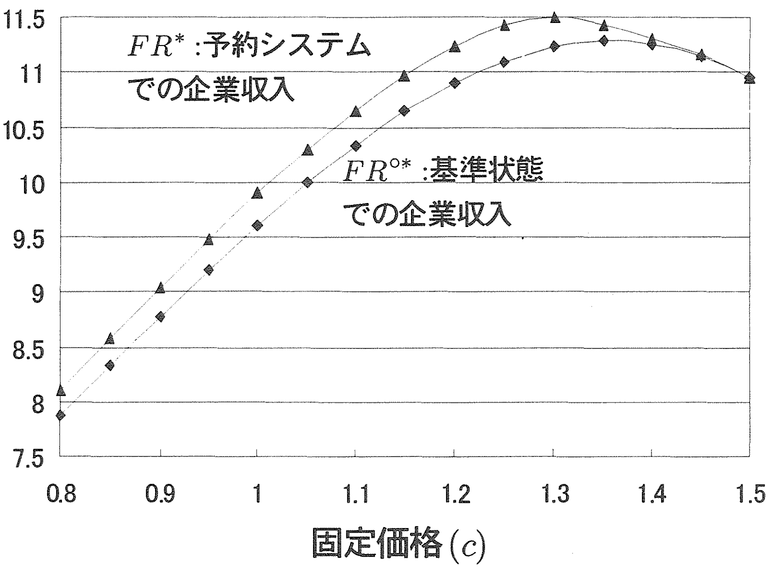
予約システムが社会的に望ましいかどうかを判断する基準としてオプション価格を前節において導入し，予約システムの導入により消費者余剰が減少することを示した．しかし予約システムの妥当性を検討するためには社会的最適性について議論する必要があるため，消費者余剰のみで評価するのは不十分であろう．そこで本節では他の一般的な手法と考えられる社会的厚生に主眼をおいて検討を行うこととする．事前購入割引の正当性についても社会的厚生の観点から考察を行う．

社会的厚生の最適化を満たす条件は生産者余剰と消費者余剰の和を最大化することが標準的な仮定の1つである．本研究では航空機や新幹線などの長距離公共交通においては固定費用が占める割合が非常に高いことから，短期的には容量を変動させることはできないために可変費用を0とし総費用（固定費用）は一定であるという強い仮定を設けている．その場合，生産者余剰は企業収入から可変費用を差し引いたもので表されるとしてよい．しかるに企業行動を含んだ市場均衡モデルの定式化を特別考慮する必要はなく，社会的厚生の定式化を行う際には企業収入と消費者余剰の和のみで表現すればよい．したがって，企業収入と消費者余剰について定式化を行う．

始めに予約システム下における企業収入FR^*，基準状態における企業収入$FR^{\circ *}$の最大化問題を定式化する．ここでは企業は価格c_tおよびキャンセル料のペナルティ率αを自由に設定でき，容量Qは固定されているものと仮定する．

$$\max_{c_t,\alpha} FR^*$$

$$s.t. \quad \begin{cases} p_0^*(\tilde{p}_0^*, \tilde{p}_1^*) = \tilde{p}_0^* \\ p_1^*(\tilde{p}_0^*, \tilde{p}_1^*) = \tilde{p}_1^* \end{cases} \tag{5.63}$$



図－１６ 固定価格における企業収入

$$\max_{c_1} FR^{\circ *}$$
$$s.t. \quad p_1^{\circ *}(\tilde{p}_1^{\circ *}) = \tilde{p}_1^{\circ *} \tag{5.64}$$

予約システム下においては企業収入 FR^* は，サービスの利用者から徴収することによって得られる収入と予約成功者の中からキャンセルを行う家計から徴収するペナルティ料との和によって与えられることから

$$FR^* = (E[n_0^*] - E[m|n_0^*])c_0 + \delta E[n_1^*]c_1 + \delta E[m]\alpha c_0 \tag{5.65}$$

と表せる（時点 $t = 0$ で予約購入できる家計については割り引く必要はない）．同様に基準状態における企業収入 $FR^{\circ *}$ は次式のようになる．

$$FR^{\circ *} = \delta E[n_1^{\circ}]c_1 \tag{5.66}$$

本節におけるパラメータは標準ケースと同一とする．すなわちサービスに対する確定効用が $v^* = 1$，確率効用項が標準正規分布 $N(0,1)$ に従って分布し，留保効用のパラメータを $\mu = 2$，チケット価格 $c_t = c = 1$，取引費用 $\omega = 0.002$，キャンセルのペナルティ率 $\alpha = 0.1$，総家計数 $N = 100$，サービスの供給数 $Q = 10$，割引率 $\delta = 0.9975$ と設定する．**図－１６**は標準ケースにおいて，固定価格 c を変動させた場合の企業収入を表している．この数値計算から明らかになる

のは，ある価格において基準状態から予約システムを導入することによって企業収入は増加するということである．これはキャンセルによる手数料収入の影響によるもので，一般的にキャンセル料を徴収しない $(\alpha = 0)$ 場合には企業収入は減少する．また，企業収入の最大化の観点から企業が選択する価格は基準状態では $c = 1.35$ であったものが，予約システム下では $c = 1.3$ となる．すなわち固定価格における予約システムの導入によって企業の設定価格が低下する可能性を示唆している．

次に最終的に配分された事後の状態を下に消費者余剰を立式する．前節におけるオプション価格の導出の際に期待効用 $EV^*(v)$，$EU^*(v)$ を用いたが，これは購入可能確率を利用して将来に実現する効用の期待値である．企業収入はサービスの配分後の家計の期待値を用いることと整合性を取るために，消費者余剰は期待効用の概念を用いず，各家計が得る効用を集計化することによって導出する．始めに予約システムが存在する環境においてサービスを利用する家計について考える．その家計の形態として１）時点 $t = 0$ で予約に成功し時点 $t = 1$ でキャンセルせず利用する，２）時点 $t = 0$ では購入しなかったものの時点 $t = 1$ で購入に成功するという２種類が考えられる．まず１つめのケースにおいて時点 $t = 1$ で利用する条件はキャンセルを行う臨界効用 $\beta(v)$ が留保効用 ε を上回ること（その確率は $G(\beta(v))$ である），２つめについては時点 $t = 1$ で購入するにはサービスを購入するための最小の効用 $\gamma(v)$ が留保効用を上回ることが必要であり，その確率は $G(\gamma(v))$ と表される．また時点 $t = 0$ に予約の意思決定の基準はサービス効用 v と臨界予約効用 $\bar{v}$ との比較であることを考慮して行われることから，時点 $t = 0$ で予約に成功し時点 $t = 1$ でキャンセルせず利用する家計のサービス効用の期待値 $E[v|v \geq \bar{v}]$ は

$$E[v|v \geq \bar{v}] = \frac{\int_{\bar{v}}^{\infty} vG(\beta(v))f(v)dv}{\int_{\bar{v}}^{\infty} G(\beta(v))f(v)dv} \tag{5.67}$$

と表される．また時点 $t = 0$ では購入しなかったものの時点 $t = 1$ で購入に成功する家計のサービス効用の期待値 $E[v|v < \bar{v}]$ は

$$E[v|v < \bar{v}] = \frac{\int_{\gamma^{-1}(0)}^{\bar{v}} vf(v)G(\gamma(v))dv}{\int_{\gamma^{-1}(0)}^{\bar{v}} f(v)G(\gamma(v))dv} \tag{5.68}$$

となる．ただし $\gamma^{-1}(0)$ は $\gamma(v) = 0$ となる v である．

予約システム下で時点 $t = 0$ において購入できたものの留保効用 ε が大きくなったためにキャンセルを行う家計について考える．サービス効用 v の家計がキャンセルを行うのは留保効用 ε がキャンセルを行う臨界効用 $\beta(v)$ を超えた時であり，その場合の留保効用の期待値 $E[\varepsilon|\varepsilon > \beta(v)]$ は

$$E[\varepsilon|\varepsilon > \beta(v)] = \frac{\int_{\beta(v)}^{\infty} \varepsilon g(\varepsilon)d\varepsilon}{\int_{\beta(v)}^{\infty} g(\varepsilon)d\varepsilon} \tag{5.69}$$

と表される．またサービス効用vの家計がキャンセルを行う確率は$1-G(\beta(v))$であり，代わりに獲得する留保効用の期待値は$E[\varepsilon|\varepsilon>\beta(v)]$であることから，時点$t=0$で予約購入できたもののキャンセルを行う家計が得る留保効用の期待値$E[\varepsilon|v\geq\bar{v}]$は

$$E[\varepsilon|v\geq\bar{v}]=\frac{\int_{\bar{v}}^{\infty}E[\varepsilon|\varepsilon>\beta(v)]f(v)(1-G(\beta(v)))dv}{\int_{\bar{v}}^{\infty}f(v)(1-G(\beta(v)))dv} \tag{5.70}$$

と表せる．

次に時点$t=1$において留保効用εが大きくなったためにサービスを購入しなかった家計について考える．サービス効用vの家計が時点$t=1$で購入を見送るのは留保効用εが臨界効用$\gamma(v)$を超えた時であり，その場合の留保効用の期待値$E[\varepsilon|\varepsilon>\gamma(v)]$は

$$E[\varepsilon|\varepsilon>\gamma(v)]=\frac{\int_{\gamma(v)}^{\infty}\varepsilon g(\varepsilon)d\varepsilon}{\int_{\gamma(v)}^{\infty}g(\varepsilon)d\varepsilon} \tag{5.71}$$

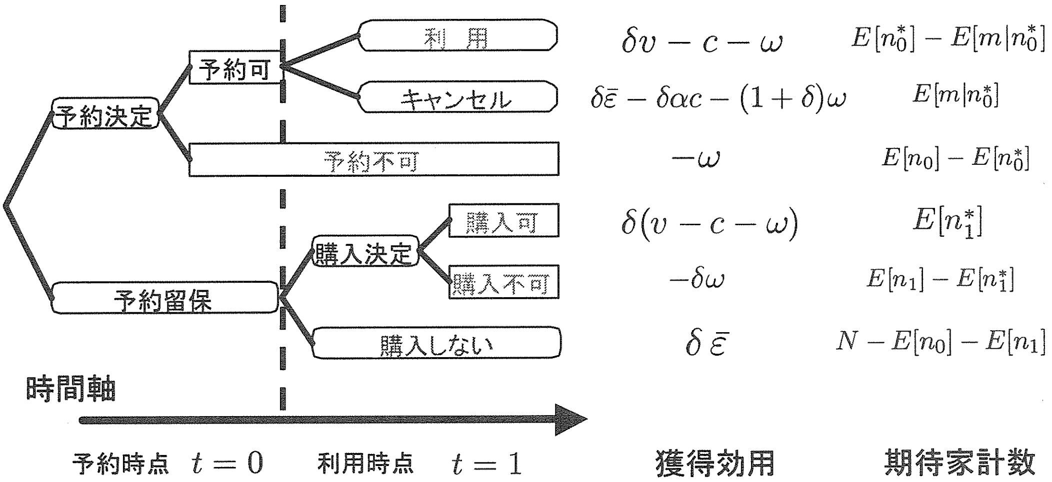
と表される．時点$t=0$には購入を留保し，時点$t=1$において購入しうる家計$(\gamma^{-1}(0)\leq v\leq\bar{v})$においては，購入を見送る確率は$1-G(\gamma(v))$で，その際の留保効用の期待値は$E[\varepsilon|\varepsilon>\gamma(v)]$である．また時点$t=1$において購入することが有り得ないほどサービス効用が低い家計$(v<\gamma^{-1}(0))$は必ず留保効用を獲得することから，時点$t=1$においてサービスを購入しなかった家計が得る期待効用の期待値$E[\varepsilon|v<\bar{v}]$は

$$E[\varepsilon|v<\bar{v}]=\frac{\int_{\gamma^{-1}(0)}^{\bar{v}}E[\varepsilon|\varepsilon>\gamma(v)]f(v)(1-G(\gamma(v)))dv+\int_{-\infty}^{\gamma^{-1}(0)}E[\varepsilon]f(v)dv}{\int_{\gamma^{-1}(0)}^{\bar{v}}f(v)(1-G(\gamma(v)))dv+\int_{-\infty}^{\gamma^{-1}(0)}f(v)dv} \tag{5.72}$$

と表される．ここで$E[\varepsilon]$は留保効用εの期待値である．

以上から予約システム下における消費者余剰の定式化を行う．ここで時点$t=1$において各家計が獲得する効用（消費者余剰）について説明する．予約システムが存在する環境においてはサービスを利用する形態として１）時点$t=0$で予約に成功し時点$t=1$でキャンセルせず利用する，２）時点$t=0$では購入しなかったものの時点$t=1$で購入に成功するという２種類が考えられる．１つめのケースは時点$t=1$で利用する場合に獲得する効用は$\delta v-c_0-\omega$であり，２つめについては時点$t=1$で購入できた場合に家計が得る効用は$\delta(v-c_1-\omega)$である．また時点$t=0$において購入できなかった家計が得る効用が$-\omega$，時点$t=0$には購入できたもののキャンセルした場合に得る効用は$\delta\bar{\varepsilon}-\delta\alpha c_0-(1+\delta)\omega$，同様に時点$t=1$において購入できなかった家計が得る効用が$-\delta\omega$，結局時点$t=1$において購入を見送った場合に得る効用が$\delta\bar{\varepsilon}$であることを考慮して（**図－１７参照**）），予約システム下における消費者余剰の期待値CS^*は次式のように表せる．

$$CS^* \;=\; (\delta E[v|v\geq\bar{v}]-c_0-w)(E[n_0^*]-E[m])$$



図－１７ 各家計が獲得する消費者余剰

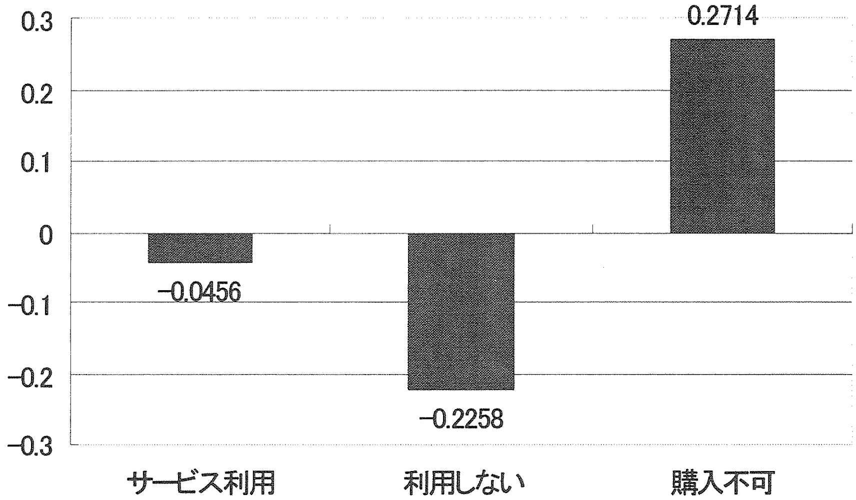
$$
\begin{aligned}
&+ \quad (\delta E[\varepsilon|v > \bar{v}] - \delta\alpha c_0 - (1+\delta)\omega)E[m] \\
&- \quad \omega(E[n_0] - E[n_0^*]) \\
&+ \quad \delta(E[v|v < \bar{v}] - c_1 - w)E[n_1^*] \\
&- \quad \delta\omega(E[n_1] - E[n_1^*]) \\
&+ \quad \delta E[\varepsilon|v < \bar{v}](N - E[n_0] - E[n_1])
\end{aligned}
\tag{5.73}
$$

次に基準状態における消費者余剰を求める．始めにサービスの購入をする家計について考える．基準状態については時点$t = 1$で始めて購入の意思決定が行われる．時点$t = 1$で購入するのはサービスを購入するための最小の効用$\gamma^\circ(v)$が留保効用εを上回ることが必要であり，その確率は$G(\gamma^\circ(v))$と表される．したがって基準状態においてサービスを購入する家計のサービス効用の期待値$E^\circ[v]$は

$$
E^\circ[v] = \frac{\int_{\gamma^{\circ-1}(0)}^{\infty} v f(v) G(\gamma^\circ(v)) dv}{\int_{\gamma^{\circ-1}(0)}^{\infty} f(v) G(\gamma^\circ(v)) dv}
\tag{5.74}
$$

と表される．式（5.74）は式(5.52)と同式である．次にサービスを購入しない家計について考える．あるサービス効用vにおいて購入を見送る場合の留保効用の期待値$E[\varepsilon|\varepsilon > \gamma^\circ(v)]$は式(5.71)と同様にして

$$
E[\varepsilon|\varepsilon > \gamma^\circ(v)] = \frac{\int_{\gamma^\circ(v)}^{\infty} \varepsilon g(\varepsilon) d\varepsilon}{\int_{\gamma^\circ(v)}^{\infty} \varepsilon g(\varepsilon) d\varepsilon}
\tag{5.75}
$$



図－１８ 家計数の変化

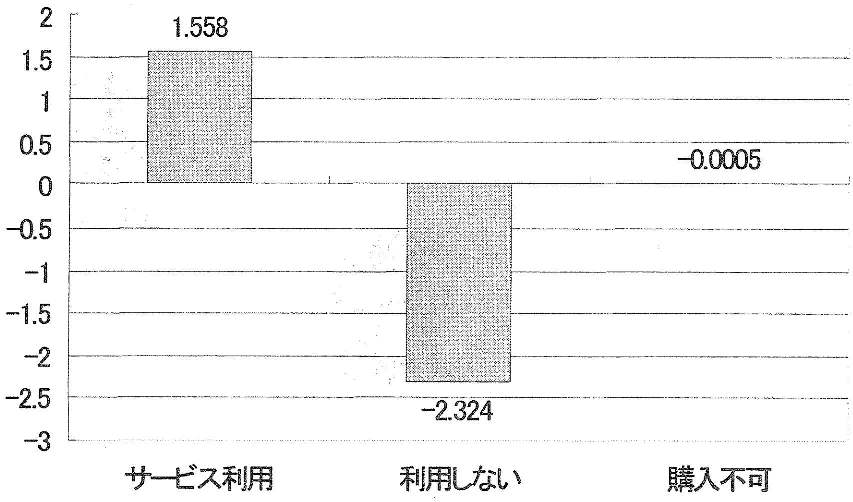
と表現される．これを用いて基準状態において時点$t = 1$に購入を見送って留保効用を獲得する場合の期待値$E^\circ[\varepsilon]$は式(5.72)と同様にして

$$E^\circ[\varepsilon] = \frac{\int_{\gamma^{\circ -1}(0)}^{\infty} E[\varepsilon|\varepsilon > \gamma^\circ(v)]f(v)(1 - G(\gamma^\circ(v)))dv + \int_{-\infty}^{\gamma^{\circ -1}(0)} E[\varepsilon]f(v)dv}{\int_{\gamma^{\circ -1}(0)}^{\infty} f(v)(1 - G(\gamma^\circ(v)))dv + \int_{-\infty}^{\gamma^{\circ -1}(0)} f(v)dv} \tag{5.76}$$

となる．以上から基準状態における消費者余剰の期待値$CS^{\circ *}$は予約システム下における消費者余剰CS^*と同様にして次式のように表される．

$$CS^{\circ *} = \delta(E^\circ[v] - c_1 - w)E[n_1^\circ] - \delta\omega(E[n_1^\circ] - E[n_1^{\circ *}]) + \delta E^\circ[\varepsilon](N - E[n_1^\circ]) \tag{5.77}$$

標準ケースにおいて消費者余剰を求めると基準状態では$CS^* = 205.457$から予約システム下では$CS^{\circ *} = 204.691$に減少する．その要因を検討するために基準状態から予約システムへと移行することによる，サービスを利用する家計とサービスを利用せず留保効用を獲得する家計，サービスを購入できなかった３通りの家計における家計数の変化を**図－１８**に，消費者余剰の変化を**図－１９**に示した．サービスを利用する家計が0.0456だけわずかに減少するにもかかわらずその消費者余剰が1.558だけ増加するのは予約システムの導入により自己選抜の機能が働くためによりサービス効用の高い家計に配分されることを裏付けるが，サービスを利用せず留保効用を得る家計の消費者余剰の減少がサービスを利用する家計の消費者余剰の増加を上回るために全体の消費者余剰も減少することになる．またサービスを購入できない家計数が0.2714だけ増加することも予約システムにおける消費者余剰に負の効果を与える．



図－１９ 消費者余剰の変化

また基準状態，予約システム下それぞれにおける社会的厚生$SW^*, SW^{\circ *}$は企業収入と消費者余剰との和として以下のように表現できる．

$$SW^* = FR^* + CS^* \tag{5.78}$$

$$SW^{\circ *} = FR^{\circ *} + CS^{\circ *} \tag{5.79}$$

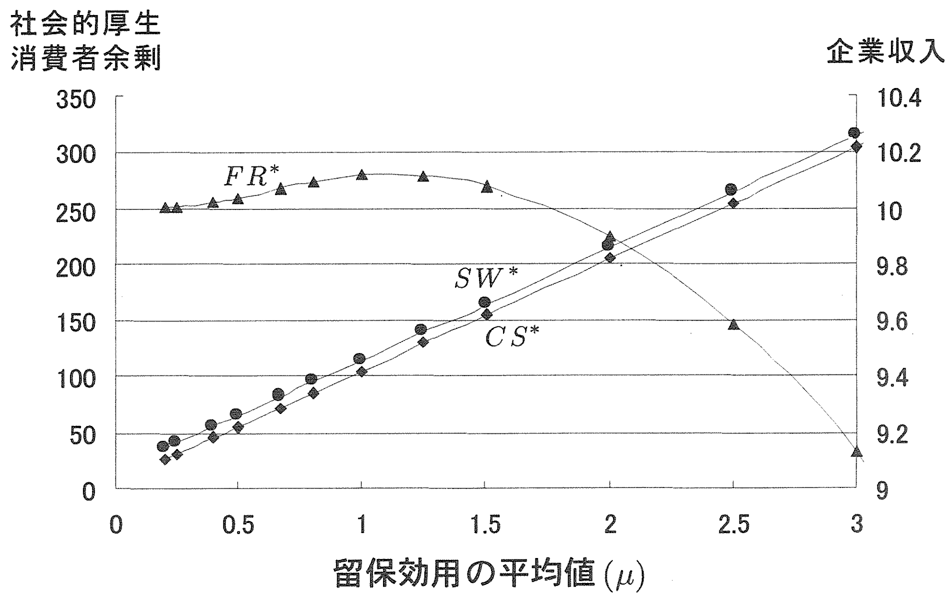
本来，社会的厚生は生産者余剰と消費者余剰の和で表されるというのが一般的だが，今回は可変費用をゼロである，すなわち固定費用のみであると仮定すると生産者余剰は企業収入から可変費用を差し引いたもので表される．よって企業行動を考慮した市場均衡モデルの定式化を行うことなく，制約条件・式(5.63),(5.64)の下で社会的厚生を調べるためには企業収入と消費者余剰の和のみで表現することができる．

また，基準状態から予約システムへと移行することによる企業収入と消費者余剰および社会的厚生の変分$\Delta CS^*, \Delta FR^*, \Delta SW^*$を次式のように表す．

$$\Delta CS^* = CS^* - CS^{\circ *} \tag{5.80}$$

$$\Delta FR^* = FR^* - FR^{\circ *} \tag{5.81}$$

$$\Delta SW^* = SW^* - SW^{\circ *} \tag{5.82}$$

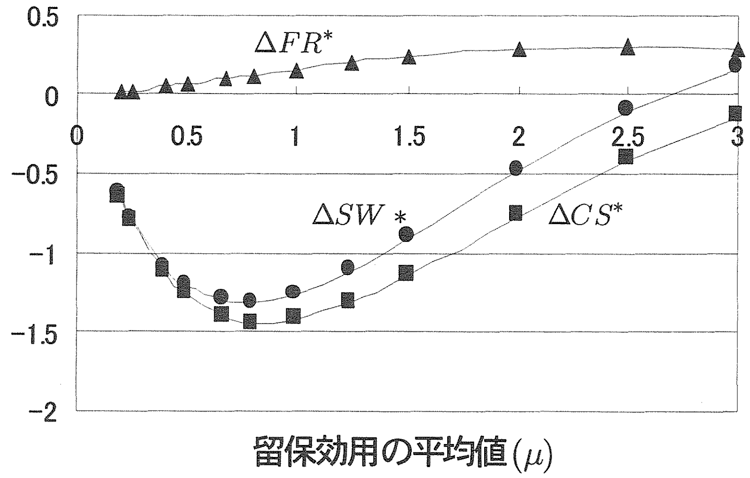


図－２０ 留保効用と効率性（１）

以下では各変数と基準状態から予約システムへと移行することによる企業収入と消費者余剰および社会的厚生との関係を考察する．パラメータ設定は標準ケースを用いている．以下の考察においてはパラメータの変化による企業収入・消費者余剰・社会的厚生についてはそれぞれの絶対量を用い，基準状態から予約システムに変化することによる企業収入・消費者余剰・社会的厚生については各々の変分を用いて検討を行うこととする．

図－２０は留保効用εのパラメータμと予約システムにおける企業収入FR^*と消費者余剰CS^*および社会的厚生SW^*を表している．企業収入に比して消費者余剰・社会的厚生の値が相対的に大きいのはサービスが割り当てられる家計が家計の総数に対して非常に限定されたケースを設定して数値計算を行っているためである．留保効用のパラメータμが増加すると留保効用を獲得する家計が得る効用が大きくなるために消費者余剰CS^*および社会的厚生SW^*は増加する．予約システムにおける企業収入FR^*は留保効用のパラメータが$\mu=1$までは将来の不確実性が高まることからキャンセルを行う家計の増大によって企業収入が増加するが，$\mu=1$を超えるとサービスを購入しないことによる収入の減少の効果が大きくなるために企業収入は減少する．

図－２１は留保効用εのパラメータμと基準状態から予約システムへと移行することによる企業収入と消費者余剰および社会的厚生の変分$\Delta FR^*, \Delta CS^*, \Delta SW^*$を表したものである．留保効用のパラメータ$\mu$が大きくなると企業収入の増分$\Delta FR^*$が大きくなるのはサービスの利用者は減少

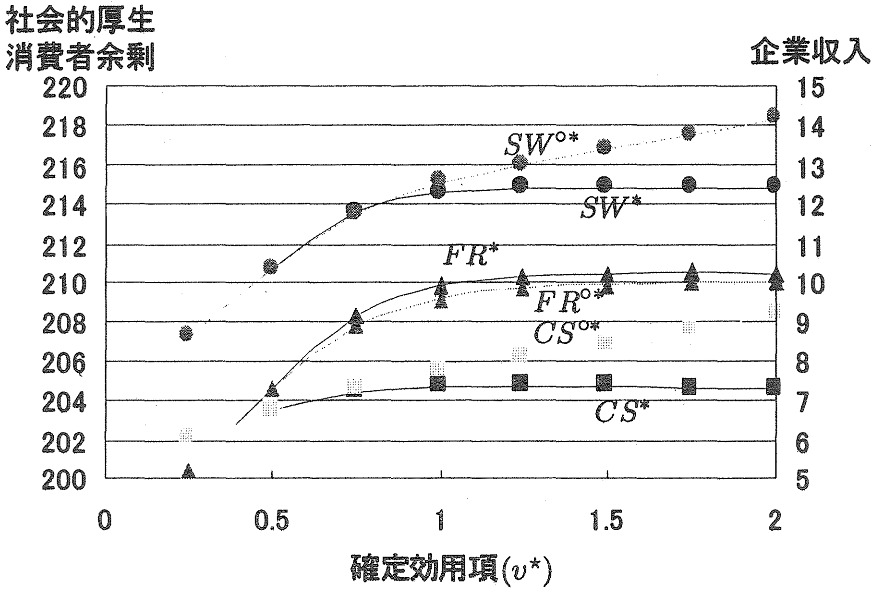


図－２１ 留保効用と効率性（２）

するものの，将来の行動の不確実性が大きくなるためにキャンセルをする家計が増加することによってキャンセルの手数料が増大するためである．次に消費者余剰の増分ΔCS^*については図－２２の$E[v] - E^\circ[v]$，図－９のΔWと密接な関係があり，需要リスクと供給リスクの影響の度合いと予約システムが自己選抜メカニズムとして機能するほど消費者余剰には負の効果を与えるという２つの影響によって決定される．社会的厚生の変分ΔSW^*は企業収入の増加が消費者余剰の減少を若干補う形になるが，この数値計算結果から留保効用が大きくなると予約システムの導入によって社会的厚生が大きくなりうることを示している．

図－２２および図－２３は家計の確定効用v^*もしくは確率効用の分散σ^2と予約システムおよび基準状態の企業収入$FR^*, FR^{\circ *}$と消費者余剰$CS^*, CS^{\circ *}$および社会的厚生$SW^*, SW^{\circ *}$を表したものである．確定効用v^*と確率効用の分散σ^2が増加すると高いサービス効用を持つ家計が相対的に増加するために企業収入と消費者余剰および社会的厚生は増加するが，容量が飽和すると企業収入は高止まりになる．

図－２４および図－２５は家計の確定効用v^*もしくは確率効用の分散σ^2と企業収入と消費者余剰および社会的厚生の変分$\Delta FR^*, \Delta CS^*, \Delta SW^*$である．企業収入については図－２０と同様にキャンセルの手数料の増加により増加するが，消費者余剰については確定効用v^*や確率効用の分散σ^2が増加の増加とともに自己選抜メカニズムの効果が働くために消費者余剰の変分は負となり，その結果社会的厚生の変分も負となり，確定効用ないしは確率効用の分散が大きくなるほど予約



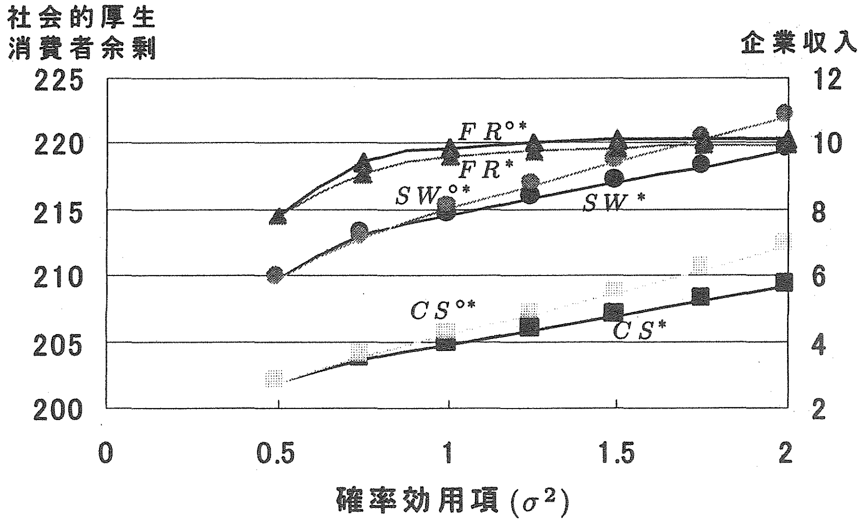
図－２２ 確定効用項と効率性（１）

システムにおける社会的厚生に悪影響を及ぼす.

図－２６はキャンセル料のペナルティ率αと予約システムおよび基準状態の企業収入$FR^*, FR^{\circ *}$と消費者余剰$CS^*, CS^{\circ *}$および社会的厚生$SW^*, SW^{\circ *}$を表したものである．基準状態から予約システムへと移行するとサービスの利用者は減少するためにペナルティ率が０の場合は企業収入FR^*が減少するが，αが0.5の近傍までは手数料による収入が増加するために企業収入FR^*は増加する．しかしαが0.5を上回ると予約を行ってもキャンセルと行うという需要リスクが大きくなるために，予約を見送る家計が大多数となるために企業収入FR^*は減少する．予約システムにおける消費者余剰CS^*はキャンセルの手数料の増加にしたがって購入を試みる家計が減少するために自己選抜のメカニズムが働かないようになり，次第に基準状態に漸近する．また社会的厚生SW^*は最大値を取る$\alpha = 0.6$においては基準状態における社会的厚生$SW^{\circ *}$を上回っており，予約システムの導入によって正の効果をもたらしうると考えられる．

図－２７はキャンセル料のペナルティ率αと企業収入と消費者余剰および社会的厚生の変分$\Delta FR^*, \Delta CS^*, \Delta SW^*$である．企業収入の変分についてはキャンセルの手数料による収入増の影響を受けて増加する．消費者余剰の変分は自己選抜メカニズムの効果が働く状況では負となるが，社会的厚生の変分はペナルティ率の設定によっては増加することを示している．

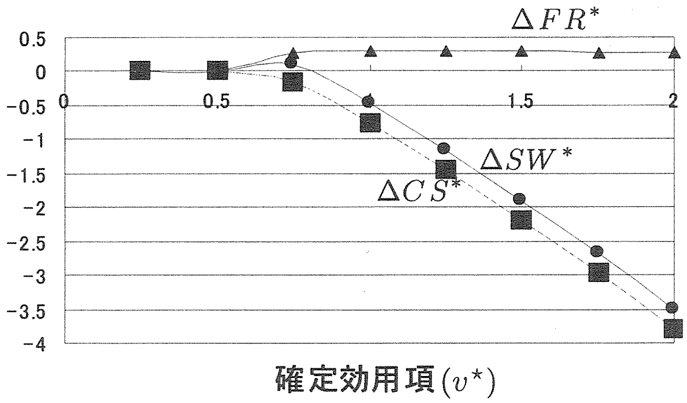
以下においては基準状態，あるいは予約システムを導入し，企業は同一価格で販売する，もし



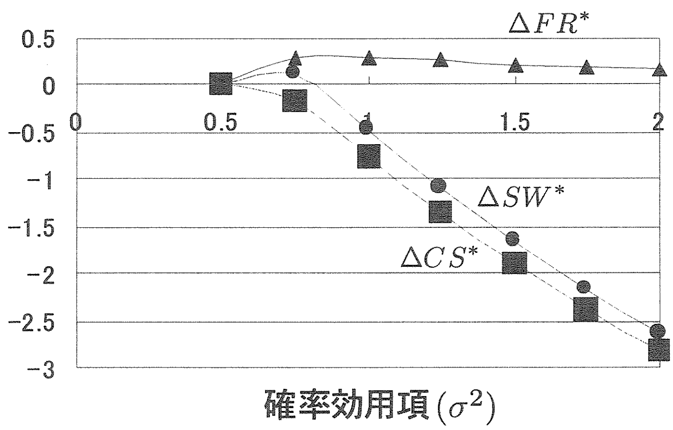
図－２３ 確定効用項と効率性（２）

くは事前購入割引を設定するかの３通りの手法から最適な価格政策について企業収入と消費者余剰および社会的厚生の最大化の観点から分析を行うこととする．価格政策の内容は，第１に基準状態すなわち時点 $t=1$ のみに価格 c でサービスを配分する方法，第２として予約システムを導入するが固定価格 c で配分する方法，第３は事前購入割引を導入し，時点 $t=1$ には他の場合と同様に価格 $c_1=c$ で販売するが，時点 $t=0$ には割引価格 c_0 で割り当てるという手法である．数値計算事例では価格 $c_0=1$ に固定している．また事前購入割引を導入した場合の企業収入と消費者余剰および社会的厚生を FR_1^*, CS_1^*, SW_1^* とする．

図－２８は基準状態と予約システムの固定価格 c および事前購入割引における価格 c_1 と各状態における企業収入 $FR^{\circ *}, FR^*, FR_1^*$ である．図－１６においても触れたように各状態において利潤最大化のために企業が選択する価格は基準状態では $c=1.35$ であり，固定価格においては $c=1.3$ である．事前購入割引を導入すると $c_1=1.53$ で利潤最大化できると同時に３種類の価格政策の中で最も利潤最大化できることが分かる．これは既存の研究で収益の最大化を図るためには価格の差別化が不可欠であるという主張を裏付けるものである．したがって独占企業に対して市場が規制を行わないような場合には企業は事前購入割引による価格の差別化を行うことによって，利潤の最大化を図ることとなる．これは近年の日本においては規制緩和による航空自由化に伴って，独占的市場に該当するような航空路線において価格の差別化を年々強めていることを表していると考えられる．新幹線などと競合する競争的市場においてはこの限りではないが，本研究のモデ



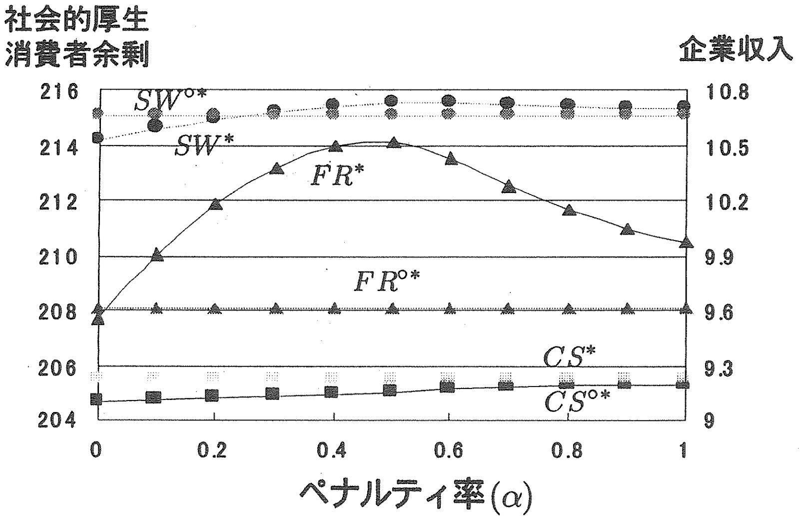
図－２４ 確定効用項と効率性（２）



図－２５ 確率効用項と効率性

ルの前提は独占的市場であるため，競争的市場における予約制度での価格政策に関する研究は今後の課題とする．

図－２９が基準状態，予約システムの固定価格cおよび事前購入割引における価格c_1とそれぞれの状態における消費者余剰$CS^{\circ *}, CS^*, CS_1^*$を表したものである．いずれのケースにおいても価格の上昇に伴って消費者余剰が減少するというのはミクロ経済学における一般的な概念に適うものであるが，その中で最大の消費者余剰をもたらす政策は基準状態を採用する，すなわち予約システムを導入せず，利用直前に一斉に販売することが望ましいことになる．また消費者余剰の最大化のためには，価格に関して消費者余剰は減少するという性質から規制者が独占的企業の利潤を減少させるよう誘導する必要がある．

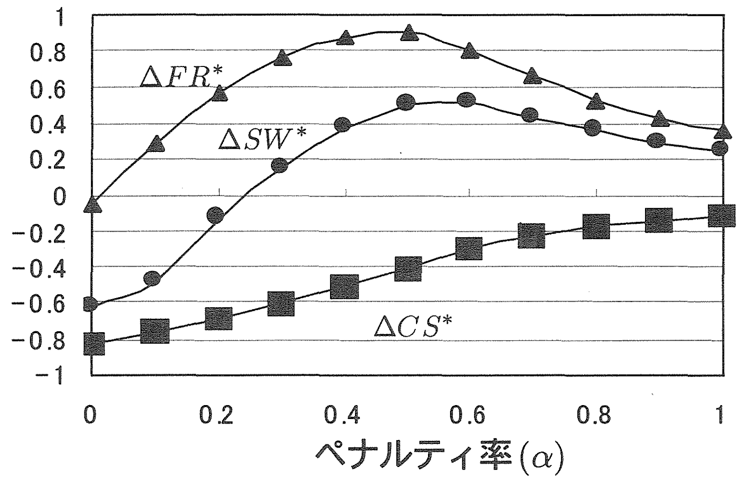


図－２６ ペナルティ率と効率性（１）

図－３０が基準状態，予約システムの固定価格cおよび事前購入割引における価格c_1と各状態における社会的厚生$SW^{\circ *}, SW^*, SW_1^*$である．社会的厚生の最大化のために規制を行う必要があるが，その場合基準状態では$c = 1.23$の近傍に価格設定されるが，事前購入割引を導入する場合には$c_1 = 1.34$の近傍に規制者は誘導する必要がある．３種類の価格政策の中で最も社会的厚生を最大化できるのは，予約システムを固定価格に設定する場合で価格$c = 1.27$が最適である．つまり予約システムを導入して社会的厚生の最大化を図る場合，事前購入割引を導入して価格の差別化を実施するという手法より固定価格として価格を規制する方が望ましいと考えられる．

以上の結果を下に今後の規制者および企業における政策の在り方について言及することとする．まず，予約システムが導入されていない環境下においては消費者余剰の最大化を目指すならば現状維持のまま独占企業がゼロ利潤となるような誘導を規制者はすべきである．しかし規制者が社会的厚生の最大化を目指すならば，予約システムを導入するとともに固定価格で規制する必要がある．この数値結果のみを下に判断すると規制者は独占企業に対して価格の差別化は認めないものの価格設定に対しては自由度を与えることは可能だと考えられる．

一方，既に予約システムが導入されているような場合には，予約制度を廃止することは現実的でないため，規制者は消費者余剰を減じないように社会的余剰の最大化を図るならば，固定価格により企業を規制する必要がある．規制緩和により非規制企業が利潤の最大化を目指すと，事前購入割引による価格の差別化を積極的に行うようになるため，消費者余剰のみならず社会的厚生



図－２７ ペナルティ率と効率性（２）

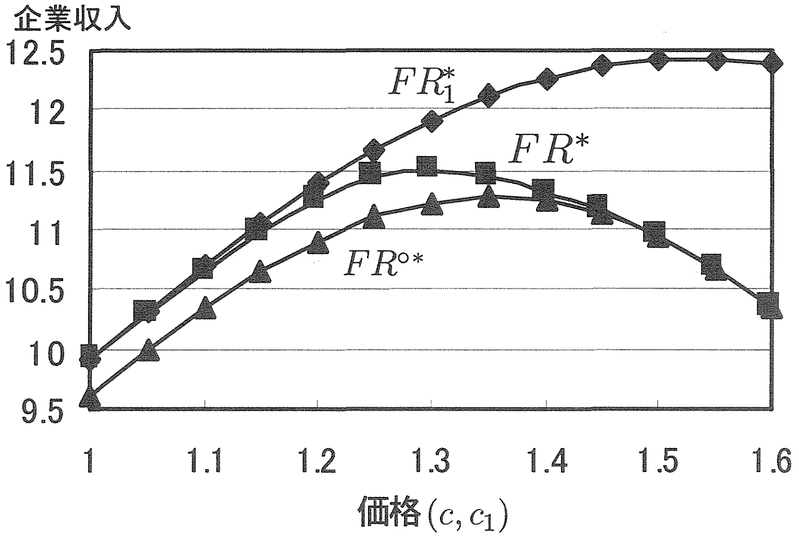
も損なわれることとなる．

ただこの結論は極めて限定された仮定の下で得られたものであるために，今後も価格政策に関する研究の必要性は依然として残されている．すなわち，本研究のモデルは独占企業が固定費用の下で利潤最大化を図るという非常に強い仮定であり，サービスの供給量も固定されている．事前購入割引の導入により利潤の増大に伴い，企業が供給量を増大させようという誘因を持つならば，社会的厚生が増加することはありうることと考えられる．また，企業利潤を消費者に還元するために所得移転を施すために，規制を行って価格を下げる方向に規制メカニズムに関する検討を行う必要性も残されている．したがって競争市場のみならず独占的競争という枠組みにおいても市場均衡のモデル化を行うことが今後の課題である．

5.5 おわりに

前章で定式化した予約行動モデルの特色は家計と企業との相互関係を考慮するとともに家計が直面する需要リスクと供給リスクを考慮して意思決定が行われることをモデル化したところにある．本章では予約システムにおける妥当性を考察する上で，最適な配分メカニズムならびに価格設定に関する分析が不可欠という観点から，予約行動モデルを用いて予約システムの導入による社会的厚生に及ぼす影響などの経済評価を様々な側面から検討を行った．

まず，予約システムが自己選抜メカニズムとして機能し，サービスに対して相対的に大きな効用を持つ家計に配分することができることをサービスを割り当てられた家計のサービスにより得

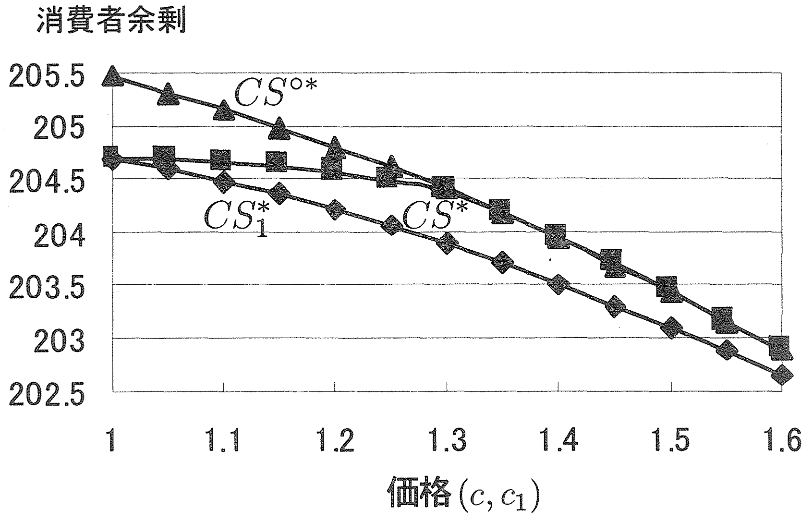


図－２８ 企業収入と価格政策

られる効用の期待値を用いて示した．予約システムの導入により自己選抜メカニズムが機能するためにより大きな効用を持つ家計に割り当てられる．特に均衡購入可能確率は低く，超過需要が大きくなるような環境においては特に自己選抜メカニズムが働く．その一方で時点 $t=0$ における均衡購入可能確率が1に漸近する，すなわち予約を行う家計が少なくなるに従って自己選抜メカニズムはあまり働かないようになる．

次に，前章で導出した予約行動モデルにおける期待効用を用いて，予約システムがもたらす経済便益を測定するためにオプション価格という指標を導入した．数値計算を行った結果，予約システムの導入によってオプション価格が一般的に負になるという結果が得られた．これは予約システムは基準状態と比較して負の効果を与える需要リスクが正の効果を及ぼす供給リスクを上回る影響を与えることが考えられる．また，予約システムが特に自己選抜メカニズムとして働く場合，すなわち超過需要が生起するほどオプション価格の値はより小さくなり，自己選抜の効果が働く代償として消費者余剰が減少することを示した．

さらに，消費者余剰と企業利潤ならびに社会的厚生の立場から最適な配分メカニズムを基準状態と予約システムを導入し固定価格で販売する，ならびに事前購入割引を導入するという選択肢の中から検討した．その結果，消費者余剰の最大化には予約システムを導入せず，固定価格で独占的企業を規制すること，企業利潤の最大化には予約システムを導入するとともに事前購入割引を認めること，社会的厚生の最大化を図るためには予約システムを固定価格で規制を行うことが



図－２９ 消費者余剰と価格政策

最適と考えられることを数値計算を通じて考察した.

参考文献

[1] Nykiel, R. : *Decade of yield management : Presented at yield management multi-industory conference*, Charlotte, N. C., 1989.

[2] Pfeifer, P. E. : The airline discount fare allocation problem, *Decision Science*, Vol.20, pp.149-157, 1989.

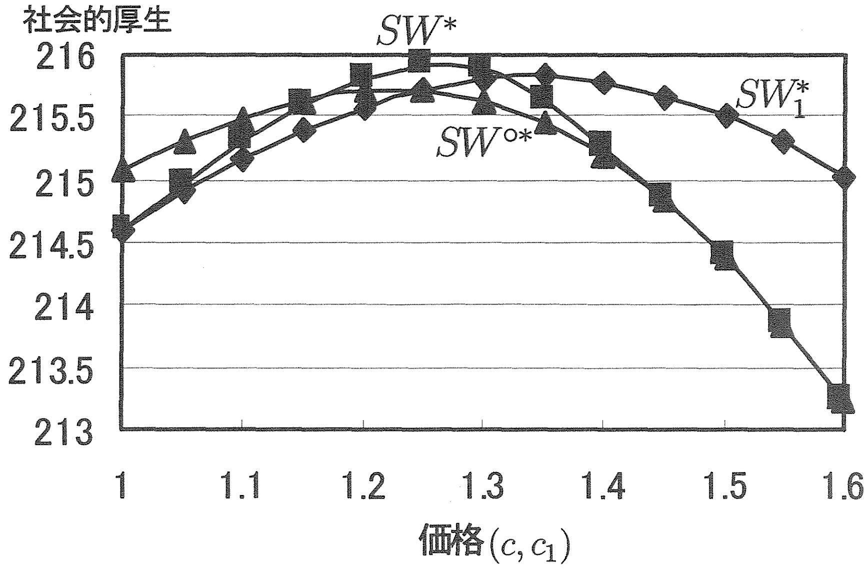
[3] 奥野正寛, 鈴村興太郎 : ミクロ経済学II, 岩波書店, 1988.

[4] Cooper, R. : On allocative distortions in problems of self-selection, *The Rand Journal of Economics*, Vol.15, pp.568-577, 1984.

[5] 酒井泰弘 : 不確実性の経済学, 有斐閣, 1982.

[6] Johansson, P.-O. : *The Economic Theory and Measurement of Environmental Benefits*, Cambridge University Press, 1987.

[7] Bishop, R. C. : Option value: An exposition and extension, *Land Economics*, Vol.58, pp.1-15, 1982



図－３０ 社会的厚生と価格政策

[8] Freeman, A. M. : Supply uncertainty, option price, and option value, *Land Economics*, Vol.61, pp.176-181, 1985.